Joana Rita Cabral Gouveia Coelho Medeiros

Licenciada em Ciências de Engenharia Mecânica

Conceção e Projeto de um Sistema Mecânico para Ensaio de Materiais Metálicos Sujeitos a Elevadas Taxas de Deformação

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Doutor Rui Fernando Martins, Professor Auxiliar, FCT-UNL/DEMI

Júri:

Presidente: Prof. Doutor António Gabriel Marques Duarte dos Santos
Arguente: Prof. Doutora Marta Isabel Pimenta Verdete da Silva Carvalho
Vogal: Prof. Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira Martins

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março 2017

Conceção e Projeto de um Sistema Mecânico para Ensaio de Materiais Metálicos Sujeitos a Elevadas Taxas de Deformação

Agradecimentos

Aproveito para agradecer às pessoas que se cruzaram comigo durante o meu percurso académico e que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a minha evolução, a toda a minha família e aos amigos, mas em especial:

Ao professor, Rui Martins, orientador deste trabalho, agradeço pelos seus conselhos, pela disponibilidade e dedicação que sempre teve.

Ao meu pai, Victor, é impossível exprimir o quanto lhe sou grata por ter proporcionado a concretização de mais este objetivo. Agradeço-lhe pelo seu exemplo.

À minha mãe, Alexandra, por ser sempre a companheira que me animou e aliviou a pressão dos momentos mais difíceis.

À minha tia, Dalila, pela forma como me acolheu e por ser testemunha do meu percurso.

Aos meus irmãos, Vítor e Hugo, e às minhas irmãs, Filipa e Mónica, os amigos de sempre e para sempre.

À irmã que este curso me deu, Joana, por todas as dificuldades que ultrapassamos juntas e por todos os momentos de sucesso que festejamos.

Ao Vasco, pela forma como sempre esteve disponível para ajudar, apoiar e motivar.

Resumo

Este trabalho foca-se na conceção e projeto de um sistema mecânico a utilizar no estudo das propriedades mecânicas de materiais metálicos quando sujeitos a taxas de deformação elevadas, nomeadamente no desenvolvimento de um sistema de Barra de Kolsky para realização de testes de compressão. A implementação deste trabalho permitirá ao Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) da FCT-UNL testar materiais metálicos, e não só, sob elevadas taxas de deformação, tanto para uso próprio como para terceiros. Com pequenas alterações ao projeto do sistema mecânico apresentado, poder-se-ão ensaiar materiais poliméricos ou compósitos.

Na fase inicial da dissertação, procedeu-se à pesquisa bibliográfica necessária à análise teórica dos ensaios realizados com a Barra de Kolsky, tendo sido sintetizada a formulação relevante. Posteriormente, iniciou-se a conceção do sistema mecânico, com vista à escolha cuidada dos elementos mecânicos relevantes e da instrumentação a utilizar, tendo sido considerado que o material em estudo seria o aço AISI 4130 e que os ensaios seriam realizados com uma taxa de deformação máxima de 5000 s^{-1}.

De forma a contextualizar a formulação apresentada, procedeu-se a estudos teóricos e a simulações numéricas, com recurso ao *SolidWorks Motion,* tendo-se realizado a simulação do choque entre as barras com uma velocidade de impacto de 62,46 m/s.

No final da dissertação apresenta-se um custo aproximado para a aquisição dos componentes envolvidos na montagem e operacionalização do sistema mecânico desenvolvido.

Palavras-chave: Barra de Kolsky, Elevada Taxa de Deformação, Comportamento Mecânico dos Materiais

Abstract

This dissertation focuses on the conception and design of a mechanical system to be used in the study of the mechanical properties of metallic materials when subjected to very high strain rates during compression tests. The implementation of this work will allow the Department of Mechanical and Industrial Engineering (DEMI) to carry out experimental tests on metallic materials, or others, under high strain rates, either for own use or for others. With small changes to the design of the mechanical system presented, it will be possible to test polymeric or composite materials.

At the initial stage of the elaboration of the dissertation herein presented, a theoretical analysis of the Kolsky Bar test was carried out, having been synthesized relevant information to the development of the project. In addition, subsequent design started with a careful choice of the mechanical elements and the instrumentation to be used, taking into account that the material to be tested would be AISI 4130 steel at a maximum deformation rate of 5000 s^{-1}.

In order to verify the functioning of the designed system, theoretical studies and numerical simulations were carried out using SolidWorks Motion, and a shock's simulation between bars was performed considering an impact velocity of 62,46 m/s.

At the end of the dissertation, approximate costs for the acquisition of the components and its assembly are furnished.

Keywords: Kolsky Bar, Very High Strain Rates, Mechanical Behavior of Materials

Índice

Índice de Figuras

Índice de Tabelas

Capítulo 1 – Introdução

1.1. Enquadramento

A Barra de Kolsky, também conhecida por Barra de Hopkinson é uma ferramenta de caracterização da resposta dos materiais quando sujeitos a taxas de deformação elevadas, isto é, na ordem dos 10^3 a $10^4 s^{-1}$[1]. Com a realização deste ensaio pretende-se medir a tenacidade e a resistência do material sob condições de impacto, tais como, colisões automobilísticas ou impactos balísticos, cujo estudo não é possível com o equipamento de ensaios de tração ou compressão convencional.

1.2. Objetivo e Motivação

Na elaboração desta dissertação pretende-se desenvolver um sistema mecânico que vise estudar a influência da aplicação de diferentes taxas de deformação nas propriedades mecânicas de alguns materiais metálicos, nomeadamente de aços, ligas de magnésio e ligas de titânio. Para esse efeito, foi concebido e dimensionado um sistema mecânico que pretende-se que seja fabricado, montado e testado no DEMI.

Em variadas aplicações específicas existe a necessidade de se determinarem as propriedades mecânicas dos materiais quando sujeitos a elevadas taxas de deformação, tal como acontece em situações envolvendo fenómenos explosivos, balística, terramotos, metalurgia, entre outros [2].

Na Tabela 1.1 são apresentadas algumas características de um ensaio convencional e de um ensaio com elevada taxa de deformação, como são exemplo, o ensaio de compressão/tração uniaxial (Figura 1.1) e a Barra de Kolsky (Figura 1.2), respetivamente. Uma das maiores diferenças entre estes dois ensaios é o efeito das elevadas forças de inércia e das ondas de tensão existentes no ensaio a elevadas taxas de deformação [2].

Figura 1.1 – Máquina de ensaios universal convencional [3]

Figura 1.2 – Sistema de Barras de Kolsky [4]

Quando se comparam os resultados dos ensaios realizados a diferentes materiais a baixas taxas de deformação com os realizados a elevadas taxas de deformação, são verificados aumentos de cerca de 30% na tensão de cedência do material, bem como aumento na sua tenacidade e nos valores de extensão de rotura (Figura 1.3). Em alguns casos, verifica-se proporcionalidade direta entre os valores da taxa de deformação e a tensão de cedência, assim como entre a ductilidade e o aumento da taxa de deformação [1].

Tabela 1.1 - Distinções entre um ensaio convencional e o ensaio a alta velocidade [2]

	Ensaio Convencional	**Ensaio Elevada Taxa de Deformação**
	Quase estático	Dinâmico
Tempo característico [s]	10 a 10^2	10^{-6} a 10^{-4}
Taxa de deformação [s^{-1}]	10^{-5} a 10^{-1}	10^2 a 10^4
Mecanismo de Teste	Hidráulico ou de Fuso	Impacto explosivo ou mecânico
Forças de Inércia	Desprezáveis	Consideráveis
Estado Plano de Tensão	Sim	Sim
Nível de Tensão	Baixo	Moderado-alto
Estado de Tensão	Constante	Onda de tensão elástica

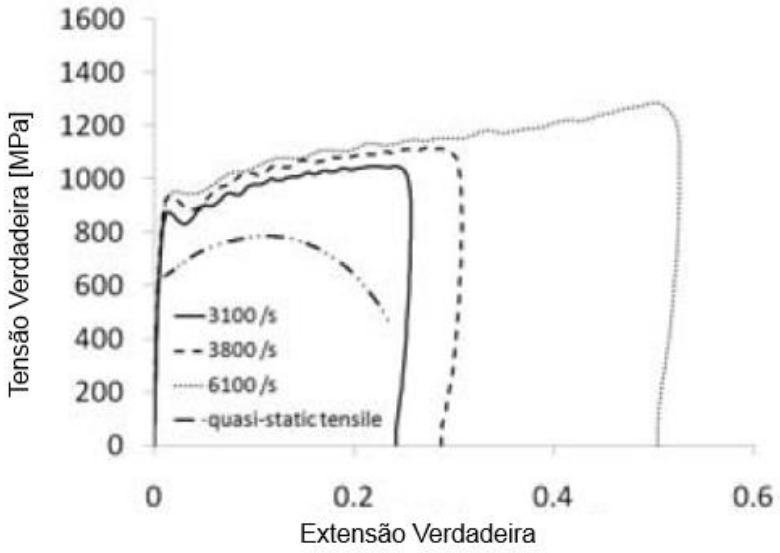


Figura 1.3 – Curva característica para HY80 a diferentes taxas de deformação (adaptado de [1])

Em suma, a realização de ensaios através do dispositivo de Barra de Kolsky permite obter a curva de tensão-extensão de materiais dúcteis, dependendo das dimensões do provete, quando o mesmo é sujeito a uma elevada taxa de deformação [2], característico de aplicações de engenharia muito específicas (por exemplo: balística, colisões, etc…).

Capítulo 2 – Descrição de uma Barra De Kolsky

2.1. Introdução Histórica

Por ordem cronológica, a primeira aproximação aos ensaios de materiais sujeitos a elevadas taxas de deformação foi feito por John Hopkinson (1849-1898), quando, em 1872, testou um arame de ferro à rotura por impacto de um peso em queda. Com esta experiência foi possível conhecer a distribuição de tensão no fio (localização da fratura); contudo, no século XIX, medir essas tensões era um processo ainda pouco desenvolvido.

Em 1914, foi a vez de Bertram Hopkinson (1874-1918), filho de John Hopkinson, criar um dispositivo de ensaio capaz de medir a pressão provocada por um explosivo ou por colisões de balas a alta velocidade. Neste caso, a pressão provocada pelo impacto foi medida, tendo sido obtida uma curva pressão-tempo de acordo com as tecnologias de medição existentes na época em que foi realizado o ensaio.

Foi em 1948 que Davies aperfeiçoou a técnica de recolha de dados, medindo eletricamente os movimentos axiais e radiais da barra submetida a carregamento por detonação através do uso de placas paralelas e de microfones de condensador. Nesse mesmo ano, examinou o fenómeno de dispersão das ondas de tensão quando propagadas em barras compridas [5].

Herbert Kolsky (1917-1992) foi o primeiro a aplicar o método da Barra de Hopkinson para medir a resposta tensão-extensão dos materiais sujeitos a impacto. Para isso, em 1949, desenvolveu um equipamento, análogo ao de Davis, com a diferença que eram usadas duas barras, nomeadamente: a barra de entrada e a barra de saída, entre as quais se situava o provete a ensaiar. Deste modo, Kolsky obteve a reposta em termos de tensão e extensão de diversos materiais, inclusive borrachas sintéticas e naturais, e também polietileno, polimetilmetacrilato (PMMA), cobre e chumbo. A Barra de Hopkinson é também designada por Barra de Kolsky, por ser esta última a versão mais utilizada até hoje.

Em 1954, Kraft integrou o uso de extensómetros nas barras de entrada e de saída como sistema de medição da extensão, bem como o uso de uma barra de impacto para geração do impacto na barra de entrada.

Até ao presente, a Barra de Kolsky tem sido alvo de inúmeros estudos e inovações, vindo a ser alterada consoante o material em estudo e o carregamento pretendido, sendo possível a realização de ensaios à tração e à torção [4][6].

2.2. Os Seus Componentes

Um mecanismo de Barra de Kolsky, como esquematizado na Figura 2.1, pode ser subdividido em três grandes conjuntos: o sistema de impacto, as barras e os seus acessórios e o sistema de aquisição, condicionamento e gravação de dados.

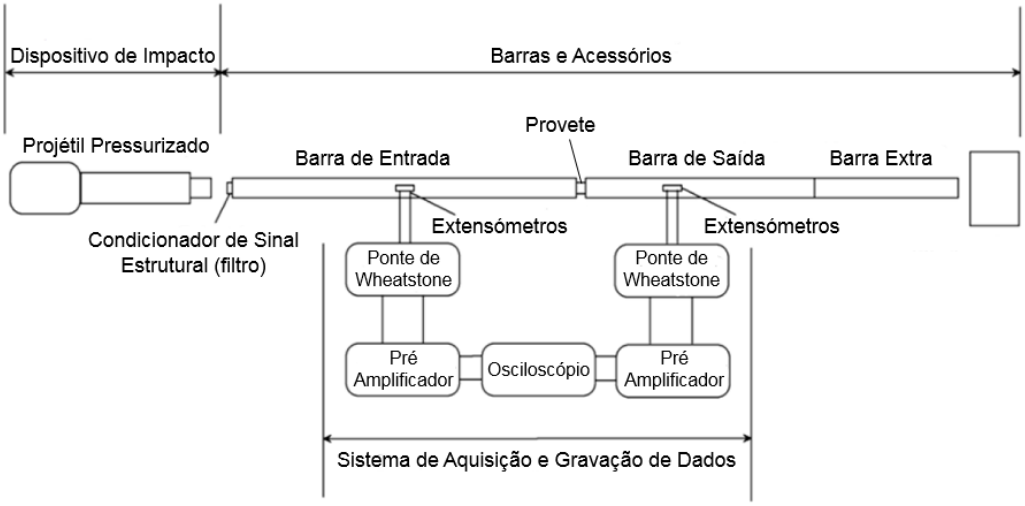


Figura 2.1 – Esquematização do mecanismo de Barra de Kolsky
(adaptado de [7])

O sistema de impacto é o conjunto de engenhos/componentes que permite fazer a aceleração e a colisão da barra de impacto na barra de entrada, e tem de apresentar condições que permitam um carregamento estável, controlável e repetível [4]. Esta barra de impacto pode ser descrita como um projétil que adquire velocidade, habitualmente por aplicação de pressão a uma das suas extremidades. Os carregamentos dinâmicos, tal como a detonação inicialmente usada por Kolsky, são os mais utilizados para induzir o movimento da barra de impacto.

O segundo grupo de componentes é constituído por uma barra de entrada, uma barra de saída, entre as quais se encontra o provete a ensaiar, uma barra extra opcional e um mecanismo de travagem no final. As características das barras são determinantes no sucesso do estudo. Estas devem ser fabricadas num material isotrópico, com tensão de cedência elevada, e permitir que a tensão propagada no interior da barra seja mensurável no seu exterior; de modo a garantir a propagação unidimensional da onda de tensão, as barras devem ser retilíneas e esbeltas, e apresentar o mínimo de atrito possível nos seus apoios. Tipicamente, as barras são todas do mesmo material e têm o mesmo diâmetro, devendo estar alinhadas entre si, com o provete e com o sistema de impacto, num eixo comum.

Quanto à recolha de dados, a extensometria tornou-se o método de eleição. No entanto, como o sinal lido nas pontes de Wheatstone é da ordem dos milivolts, é necessário utilizar-se um sistema capaz de amplificá-lo e condicioná-lo, aumentando assim a precisão da sua leitura. É essencial ter também em conta a frequência de aquisição de todo o sistema de recolha de dados, que deverá ser no mínimo de 100 kHz, para que consiga captar um sinal transiente [4] (Figura 2.2). A Figura 2.2 mostra várias curvas, que representam um mesmo sinal produzido na barra de Kolsky, quando aplicados diferentes filtros (100 kHz, 3 kHz e 100 Hz). É percetível que se o filtro adotado não for o mais apropriado, como é o caso de 100 Hz e o de 3 kHz, não é possível realizar uma leitura correta do sinal, mesmo que o osciloscópio tenha uma frequência de aquisição adequada.

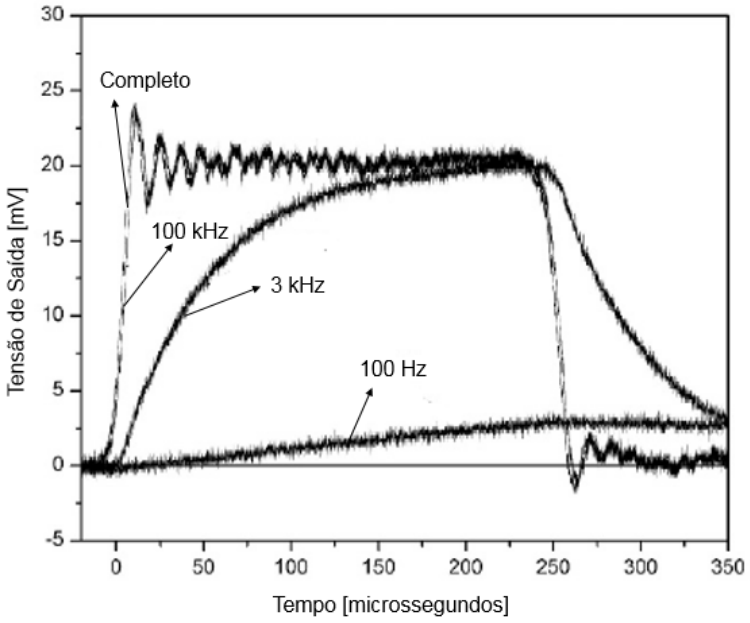


Figura 2.2 – Comparação do mesmo sinal com diferentes filtros (adaptado de [4])

2.3. Funcionamento e Formulação

A colisão a alta velocidade da barra de impacto com a barra de entrada é possível porque a barra de impacto é acelerada por intermédio de uma força que lhe imprime movimento (pressão, campo eletromagnético, etc.). A barra de impacto colide com a extremidade livre da barra de entrada, dando origem a uma onda de deformação elástica (ou onda de tensão) que se propaga até à extremidade oposta da barra de entrada, onde se encontra o provete. Essa onda é uma onda de compressão, e propaga-se pelo provete até atingir a interface provete/barra de saída. Como característica de projeto, a impedância do provete é inferior à impedância de ambas as barras que o rodeiam. Assim sendo, a mesma onda de compressão reflete na interface provete/barra de saída, permanecendo no provete com ainda "maior compressão". Quando atinge a interface provete/barra de entrada, depara-se outra vez com uma maior impedância, e é novamente refletida, com novo aumento de compressão. Este processo repete-se até que a tensão no interior do provete atinge um valor suficientemente elevado para gerar deformação não elástica, resultando na deformação plástica do provete [8]. Nem toda a energia da onda inicial é aplicada para a deformação do material em teste, visto que este tem menor impedância mecânica do que o material das barras, sendo que o remanescente da onda de deformação inicial é refletido na interface barra de entrada/provete. Este fenómeno pode ser observado de forma esquemática na Figura 2.3, onde se representa a posição da onda de deformação, x, em função do tempo, t, sendo que ε_i diz respeito à onda incidente, ε_r corresponde à onda refletida e ε_t à onda transmitida.

Aquando da colisão ($t = 0$) entre a barra de impacto e a barra de entrada, a onda de tensão propaga-se também na barra de impacto, na direção oposta à que se propaga na barra de entrada, e vai percorrer todo o seu comprimento até à sua face posterior, onde é refletida,

voltando a percorrer o mesmo trajeto no sentido inverso até atingir a interface barra de impacto/barra de entrada. O tempo do processo descrito denomina-se por período da onda de deformação inicial, T, encontra-se representado na Figura 2.3, e é dado por,

$$T = \frac{2\,L_{BI}}{c_{BI}} \quad [s] \tag{1}$$

onde L_{BI} é o comprimento da barra de impacto e c_{BI} é a velocidade de propagação da onda elástica no material da barra de impacto.

Nas interfaces entre barras, a impedância governa as amplitudes dos impulsos transmitido e refletido, sendo que, quando a impedância do provete é inferior às das barras, uma onda de tração elástica é refletida na barra de entrada e uma onda de compressão elástica é transmitida à barra de saída [9]. Durante o ensaio, a impedância mecânica pode variar, se, por exemplo, ocorrer rotura do provete, deformação plástica ou aumento de área [10].

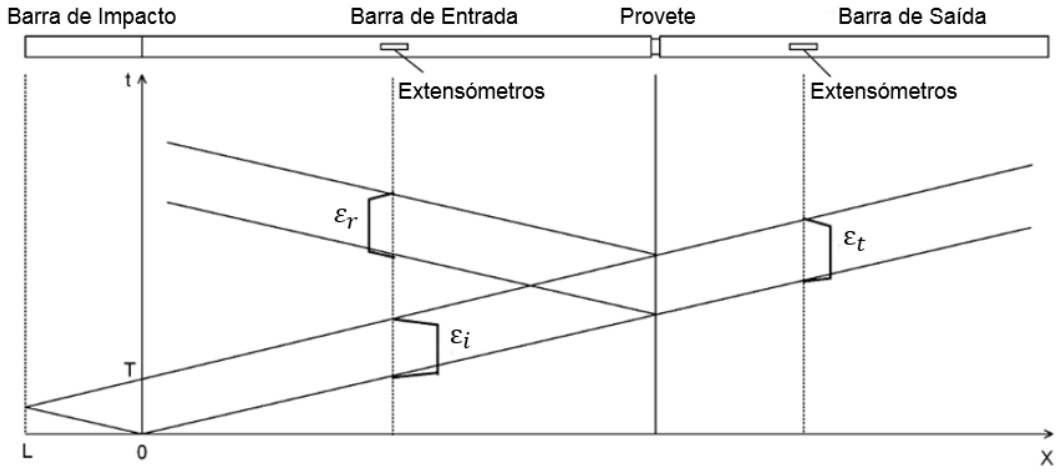


Figura 2.3 – Representação das ondas de deformação ao longo de uma Barra de Kolsky (adaptado de [7])

A velocidade de propagação depende do meio no qual a onda se propaga; neste caso, das caraterísticas do material. A velocidade de uma onda longitudinal elástica é dada por [10][11],

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [m/s] \tag{2}$$

em que E representa o módulo de elasticidade e ρ a massa volúmica do mesmo material.

Partindo da segunda Lei de Newton (3a), e aplicando-a a um elemento infinitesimal da barra, obtém-se a equação (3b). Sabendo que a área da secção da barra não varia, é possível conjugar a equação (3b) com a Lei de Hooke obtendo a equação de propagação de ondas unidimensionais (3c).

Uma solução para a equação de propagação de ondas unidimensionais é a solução D'Alembert (3d), em que as funções de impulso F e G, não harmónicas, de argumento $(x - ct)$ e $(x + ct)$, respetivamente, se propagam em sentidos opostos segundo a direção x, a uma velocidade c, para a direita ou para a esquerda, respetivamente [10][11].

$$F = m\,a \tag{3a}$$

$$-\sigma A + \left(\sigma + \frac{\delta\sigma}{\delta x}dx\right)A = \rho\,A\,dx\frac{\delta^2 u}{\delta t^2} \tag{3b}$$

$$\frac{\delta^2 u}{\delta t^2} = \frac{E}{\rho}\frac{\delta^2 u}{\delta x^2} \tag{3c}$$

$$u(x,t) = F(x - ct) + G(x + ct) \tag{3d}$$

No caso das barras, em que o impulso se propaga na direção positiva, o deslocamento $u(x,t)$, resume-se a [10] [11]:

$$u(x,t) = F(x - ct) \tag{4}$$

Pelo que a velocidade de partícula pode-se escrever

$$v(x,t) = \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = -c\,F'(x - ct) \tag{5}$$

e a deformação segundo a direção axial escreve-se

$$\varepsilon(x,t) = \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = F'(x - ct) \tag{6}$$

em que o apóstrofe representa a derivada em ordem a $(x - ct)$.
Substituindo (5) em (6) obtém-se

$$\varepsilon(x,t) = -\frac{v(x,t)}{c} \tag{7}$$

Num estado uniaxial de tensão é válido

$$\sigma(x,t) = E\,\varepsilon(x,t) \tag{8}$$

Combinando (2), (7) e (8) obtém-se

$$\sigma(x,t) = -E\frac{v(x,t)}{c} = -\rho\,c\,v(x,t) \tag{9}$$

A expressão (9) descreve a tensão, no tempo *t*, em função da velocidade das partículas e das propriedades do material do meio de propagação.
Através da conservação da quantidade de movimento é possível relacionar a velocidade das partículas, v_p, com a velocidade de impacto, v_{BI}. Considerando Q_{BI} a quantidade de movimento da barra de impacto e Q_p a quantidade de movimento das partículas, é verdade que

$$Q_{BI} = Q_p \Leftrightarrow m_{BI} \times v_{BI} = m_{onda} \times v_p \tag{10}$$

Entenda-se que devido à velocidade das partículas forma-se uma “onda de impacto”, representada a sombreado na Figura 2.4, que terá massa m_{onda}. A massa pode ser dada como o produto entre volume e a massa volúmica, e por sua vez, o volume será escrito como o produto da área pelo comprimento.

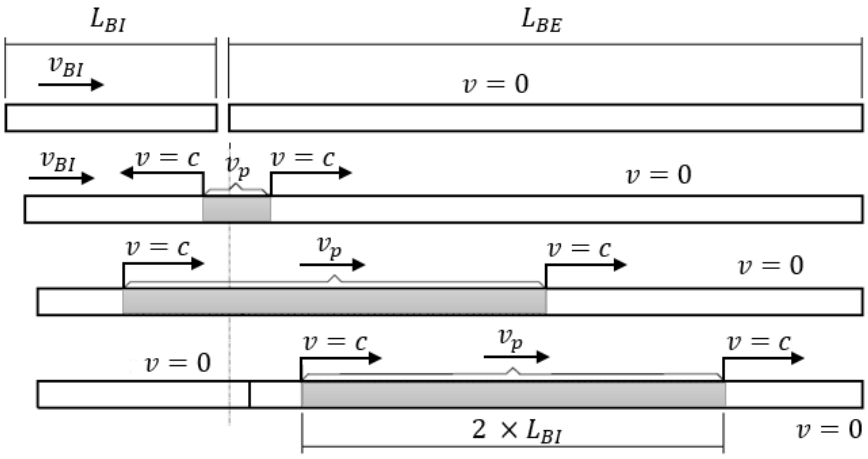


Figura 2.4 – Representação da onda de impacto

Ou seja,

$$m_{BI} = A_{BI} L_{BI} \rho_{BI} \tag{11}$$

$$m_{onda} = A_{onda} L_{onda} \rho_{onda} \tag{12}$$

Sabendo que: a área da onda, A_{onda}, corresponde à área de secção transversal da barra ($A_{onda} = A_{Barras}$); que densidade volúmica da onda será a mesma do material em que esta se propaga ($\rho_{onda} = \rho_{Barras}$); e tendo em conta que $L_{onda} = 2 \times L_{BI}$, chega-se a

$$v_{BI} = 2 \times v_p \tag{13}$$

Aplicando a relação (13) à expressão (9)

$$\sigma_{BE} = -\rho\, c_b\, \frac{v_{BI}}{2} \tag{14}$$

Ou equivalentemente,

$$\varepsilon_{BE} = -\frac{v_{BI}}{2\, c_b} \tag{15}$$

Pela expressão (14) entende-se que a intensidade da tensão na barra de entrada causada pelo impacto é diretamente proporcional à velocidade à qual se dá esse impacto. Note-se também que esta tensão será de carácter compressivo.

De maneira direta, através da lei de Hooke (16) é possível conhecer o esforço normal na secção transversal da barra, N.

$$\sigma = E\, \varepsilon \tag{16}$$

$$\frac{N}{A} = E\, \varepsilon \Leftrightarrow N = A\, E\, \varepsilon \tag{17}$$

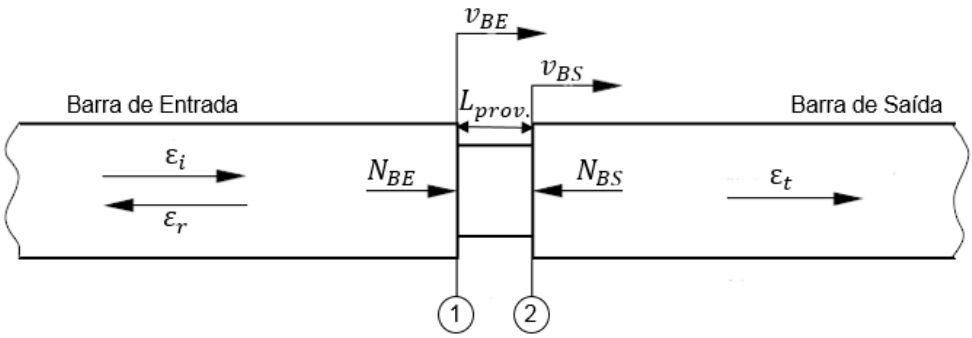


Figura 2.5 – Representação das grandezas em estudo na zona do provete de uma barra de Kolsky

A equação (17) pode ser aplicada às secções 1 e 2 identificadas na Figura 2.5, como exposto nas equações (18) e (19), sendo que, $\varepsilon_r(t)$, corresponde à deformação refletida e $\varepsilon_i(t)$ e $\varepsilon_t(t)$ às deformações incidente e transmitida, respetivamente.

$$N_{BE}(t) = A_{BE}\, E_{BE}\, [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)] \tag{18}$$

$$N_{BS}(t) = A_{BS}\, E_{BS}\, \varepsilon_t(t) \tag{19}$$

Considerando as forças de inércia desprezáveis e as barras iguais em material e dimensões, do equilíbrio das forças exteriores que atuam no provete, as equações (18) e (19) podem ser igualadas, resultando,

$$\varepsilon_t(t) = \varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) \tag{20}$$

Pode-se também escrever a tensão média que atua sobre o provete,

$$\sigma_{prov}(t) = \frac{N_{BE}(t) + N_{BS}(t)}{2 \times A_{prov}} \tag{21}$$

em que $A_{prov}\mathrm{A_p}$ é a área da secção transversal do provete. Ao substituir em (21) as equações (18) e (19) ($E_{BE} = E_{BS} = E_{barra}$ e $A_{BE} = A_{BS} = A_{barra}$) obtém-se a expressão designada por análise *3-wave* [12]

$$\sigma_{prov}(t) = \frac{A_{barra} \times \mathrm{E_{barra}}}{2 \times A_{prov}} \times [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \tag{22}$$

A tensão na interface barra de entrada/provete (equação 23) é normalmente denominada por análise *2-wave* [12]

$$\sigma_{prov-BE}(t) = \frac{A_{barra} \times \mathrm{E_{barra}}}{A_{prov}} \times (\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)) \tag{23}$$

Já a tensão na interface barra de saída/provete (equação 24) é normalmente denominada por análise *1-wave* [12],

$$\sigma_{prov-BS}(t) = \frac{A_{barra} \times \mathrm{E_{barra}}}{A_{prov}} \times \varepsilon_t(t) \tag{24}$$

Considerando novamente as secções 1 e 2 (Figura 2.5), pode-se também definir a velocidade em cada uma das secções respetivamente,

$$v_{BE}(t) = c_b \; (\; \varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) \;) \tag{25}$$

$$v_{BS}(t) = c_b \; \varepsilon_t(t) \tag{26}$$

Deste modo, a taxa de deformação no provete pode ser calculada

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{l_0} \; , logo \; \dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\Delta x}}{l_0} \tag{27}$$

$$\dot{\varepsilon_{prov}}(t) = \frac{v_{BE}(t) - v_{BS}(t)}{L_{prov}} \tag{28}$$

ou equivalentemente,

$$\dot{\varepsilon_{prov}}(t) = \frac{c_b}{L_{prov}} \; (\; \varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t) \;) \tag{29}$$

em que L_{prov} é o comprimento do provete não deformado. E ainda, recorrendo à equação (20) pode-se escrever segundo a análise *1-wave*,

$$\dot{\varepsilon_{prov}}(t) = \frac{-2 \; c_b}{L_{prov}} \times \varepsilon_r(t) \tag{30}$$

Pode-se então definir a extensão do provete como

$$\varepsilon_{prov}(t) = \int_0^t \dot{\varepsilon_{prov}}(t) \; dt = \frac{c_b}{L_{prov}} \int_0^t (\; \varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t) \;) \; dt \tag{31}$$

por meio da expressão (29), sendo esta a análise *3-wave*.

A extensão por análise *1-wave* será obtida a partir da expressão (30),

$$\varepsilon_{prov}(t) = \frac{-2 \; c_b}{L_{prov}} \int_0^t \varepsilon_r(t) \; dt \tag{32}$$

Note-se que as análises 1, 2 e 3-wave são analiticamente equivalentes, sendo que o registo da extensão incidente se fará antes do impulso incidente atingir o provete e o registo das extensões refletidas e transmitidas faz-se após a deformação do provete. Pelo facto de a técnica depender dos sinais registados, cuja duração é da ordem dos milissegundos, é importante garantir que a frequência de aquisição dos sinais seja a suficiente.

Capítulo 3 – Conceção de uma Barra de Kolsky

3.1. Condições de Projeto

Expõem-se, de seguida, as condições de projeto de uma barra de Kolsky que garantem a propagação unidimensional da onda de tensão, a separação das ondas incidente e refletida, assim como a obtenção da taxa de deformação máxima ou da tensão máxima pretendidas no provete.

O comprimento das barras e do provete afeta diretamente a tensão atingida no provete, uma vez que a intensidade desta tensão está relacionada com o comprimento da onda incidente [2]. O rácio mínimo entre o comprimento de uma barra e o seu diâmetro sugerido por [2] , é

$$\frac{L_{barra}}{d_{barra}} \geq 20 \tag{33}$$

Por [8], esta relação (33) chega a ser de 100, ou mais, quando se esperam obter extensões superiores a 30%, e dependendo das dimensões do provete. Com as condições enunciadas, assegura-se a propagação unidimensional da onda de tensão e a independência das ondas incidente e refletida, sendo possível a sua distinção durante a aquisição de dados [2].

O diâmetro das barras é uma dimensão que depende do material a ser testado, do grau de dispersão de ondas aceitável [8], bem como da taxa de deformação pretendida, sendo que quanto maior a taxa de deformação menor o diâmetro [2]. Assim, o aconselhável é

$$10\ mm \leq\ d_{barra}\ \leq 25\ mm \tag{34}$$

Quando se trata da relação entre o diâmetro das barras e o diâmetro do provete (35), observa-se que quanto maior o rácio maior a diferença entre as áreas de secção, o que possibilita o ensaio de materiais com maior resistência mecânica. No entanto, de forma a poder considerar planas as interfaces entre o provete e ambas as barras durante a transmissão do impulso, e assim ser válido o equilíbrio de forças exteriores que atuam no provete, é necessário limitar esse rácio [8]:

$$2\ \leq \frac{d_{barra}}{d_{prov}} \leq 4 \tag{35}$$

Simultaneamente, de acordo com os estudos já realizados [13] [8], verifica-se que ao limitar o rácio entre o comprimento do provete e o seu diâmetro ao intervalo apresentado em (36) o efeito do atrito entre as faces do provete e das barras não tem influência nos resultados.

$$0{,}5\ \leq \frac{L_{prov}}{d_{prov}} \leq 1 \tag{36}$$

3.2. Método de Dimensionamento

Uma barra de Kolsky tem duas condições críticas de funcionamento, nomeadamente as taxas de deformação máxima e mínima. Portanto, o seu projeto tem de satisfazer ambas as condições. A condição de máxima taxa de deformação determina a maior tensão que será transmitida às

barras, a velocidade de impacto máxima e a máxima energia necessária para a aceleração da barra incidente. Por outro lado, a condição de taxa de deformação mínima determina o comprimento mínimo das barras de entrada e saída e o maior comprimento da barra de impacto que será necessário [14]. Estas dependências, e outras posteriormente expostas, encontram-se esquematizada na Figura 3.1.

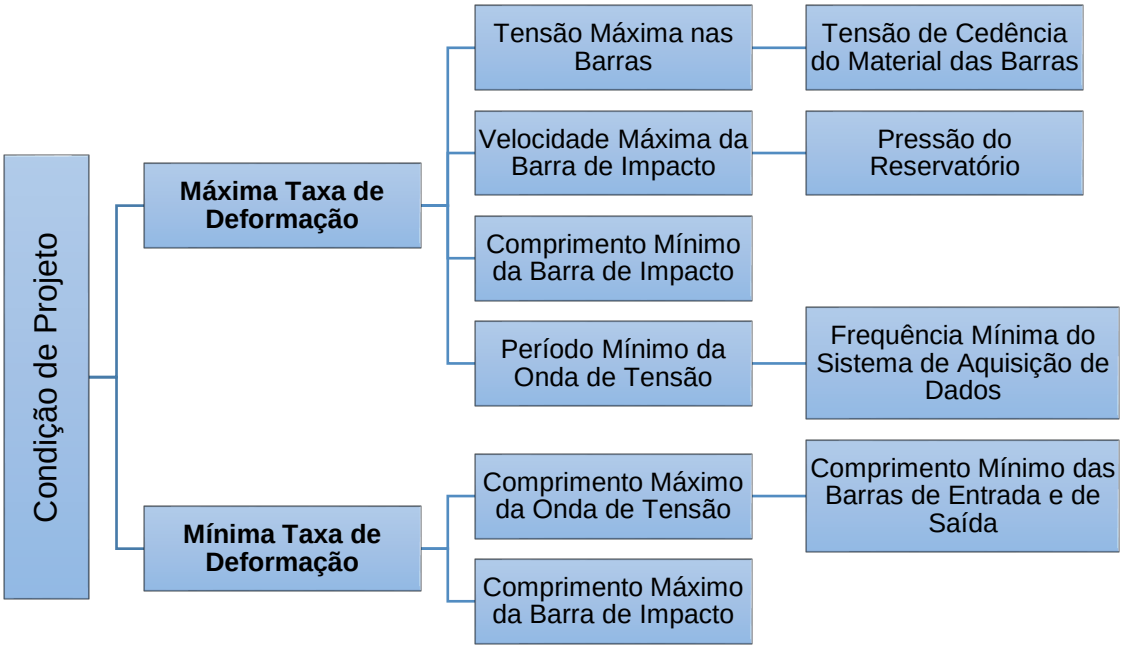


Figura 3.1 – Esquema elucidativo das dependências das grandezas

Deste modo, as limitações de espaço em laboratório, a necessidade de utilizar materiais com elevada resistência mecânica para a construção das barras e a necessidade de dispor de uma elevada pressão para o sistema de disparo são variáveis que têm de ser tidas em consideração quando se realizam testes com elevada taxa de deformação [15].

Relativamente aos ensaios, e como foi referido anteriormente, considera-se que no momento do impacto, as forças atuantes na interface de contacto entre a barra incidente e a barra de entrada são iguais, escrevendo-se:

$$A_{BI}\,\sigma_{BI} = A_{BE}\,\sigma_{BE} \tag{37}$$

De acordo com a equação (9), a tensão em cada barra pode-se relacionar com a velocidade das partículas num material linear elástico [4] :

$$\sigma_{BI} = \rho_{BI}\,c_{BI}\,(v_{BI} - v_{BE}) \tag{38}$$

$$\sigma_{BE} = \rho_{BE}\,c_{BE}\,v_{BE} \tag{39}$$

Simultaneamente, define-se a impedância mecânica das barras, Z, equação (40), como sendo uma característica que depende das propriedades físicas do material e das dimensões da área de secção de cada barra, e que está diretamente relacionada com o nível de reflexão e/ou

transmissão que ocorre em cada interface barra/provete [16]. Da equação (40), pode-se definir β, na equação (40), uma variável adimensional, como sendo o quociente entre a impedância da barra de impacto e a impedância da barra de entrada,

$$Z = A\,\rho\,c \tag{40}$$

$$\beta = \frac{A_{BI}\,\rho_{BI}\,c_{BI}}{A_{BE}\,\rho_{BE}c_{BE}} \tag{41}$$

Note-se que, quando as barras incidente e de entrada forem do mesmo material e tiverem a mesma área de secção ($A_{BI} = A_{BE}$), β toma o valor um (β = 1). Quanto menor a discrepância entre a impedância de duas interfaces melhor é a transmissão da onda, e por isso é ideal que as barras e o provete a ensaiar possuam impedância mecânica semelhante a fim de garantir a propagação de onda unidimensional [4].

Ao aplicar as expressões (37) e (38) a (39) e utilizando (41), obtém-se

$$v_{BE} = \frac{\beta\,v_{BI}}{1+\beta} \tag{42}$$

Ou, combinando (42) com (38) e (42) com (39), chega-se à tensão na barra de impacto (43) e na barra de entrada (44), respetivamente

$$\sigma_{BI} = \frac{\rho_{BI}\,c_{BI}\,v_{BI}}{1+\beta} \tag{43}$$

$$\sigma_{BE} = \frac{\rho_{BE}\,c_{BE}\,\beta\,v_{BI}}{1+\beta} \tag{44}$$

Recorrendo à equação (1), em que se define o período da onda, T, pode-se obter o comprimento da onda de deformação, L_{onda},

$$L_{onda} = c_{BE}\,T = 2\,L_{BI}\,\frac{c_{BE}}{c_{BI}} \tag{45}$$

No que diz respeito ao cálculo das tensões, por meio da análise *1-wave* (24) pode-se relacionar a tensão transmitida com a tensão no provete:

$$\sigma_t(t) = \frac{A_{prov}}{A_{BS}}\,\sigma_{prov}(t) \tag{46}$$

Simultaneamente, tendo em conta a equação (30), relaciona-se a tensão refletida com a taxa de deformação no provete

$$\sigma_r(t) = \frac{E\,L_{prov}}{-2\,c_{BE}}\,\dot{\varepsilon}_{prov}(t) \tag{47}$$

E por fim, com base na expressão (20) e nas equações 46 e 47, chega-se à tensão incidente (48):

$$\sigma_i(t) = \frac{A_{prov}}{A_{BS}}\,\sigma_{prov}(t) + \frac{E\,L_{prov}}{2\,c_{BE}}\,\dot{\varepsilon}_{prov}(t) \tag{48}$$

Sabendo que, no momento do impacto, a tensão na barra de entrada, σ_{BE}, é apenas a tensão incidente, σ_i , pode-se relacionar (44) com (48), permitindo conhecer-se a velocidade da barra incidente em função das variáveis de projeto $\sigma_{prov}(t)$ e $\dot{\varepsilon}_{prov}(t)$ (48).

$$v_{BI} = \frac{1+\beta}{\rho_{BE}\, c_{BE}\, \beta} \left[\frac{A_{prov}}{A_{BS}}\, \sigma_{prov}(t) + \frac{E\, L_{prov}}{2\, c_{BE}} \dot{\varepsilon}_{prov}(t) \right] \tag{49}$$

Rearranjando a equação (43), sendo $\beta = 1$, como justificado anteriormente, e $\sigma_{Ced.BE}$ a tensão de cedência do material da barra de entrada, pode-se determinar a velocidade máxima da barra de impacto que não provocará deformação plástica nas outras barras, através de:

$$v_{BI} = \frac{2\, \sigma_{ced.BE}}{\rho_{BE}\, c_{BE}} \tag{50}$$

Sabendo a velocidade que a barra de impacto tem de atingir para que seja verificada uma certa tensão (49), pode-se teoricamente obter a pressão que é necessária fornecer a essa mesma barra para atingir determinada velocidade. Parte-se da Segunda Lei de Newton:

$$\sum F = m \times a \;\Leftrightarrow P \times A = m \times \frac{dv}{dt} \tag{51}$$

Rearranjando e resolvendo tem-se,

$$\int P \times A\, dt = \int m\, dv \;\Leftrightarrow P \times A \times t = m \times v = m \times \frac{dx}{dt} \tag{52}$$

Integrando e resolvendo,

$$\int P \times A \times t\, dt = \int m \times dx \;\Leftrightarrow P \times A \times \frac{t^2}{2} = m \times x \tag{53}$$

Resolvendo em ordem ao tempo,

$$t = \sqrt{\frac{2 \times m \times x}{P \times A}} \tag{54}$$

Aplicando (54) em (52),

$$v = \frac{P \times A}{m} \times \sqrt{\frac{2 \times m \times x}{P \times A}} = \sqrt{\frac{2 \times x \times P \times A}{m}} \tag{55}$$

E a pressão P necessária para acelerar a barra de impacto é então dada por,

$$P = \frac{v_{BI}^2 \times m_{BI}}{2 \times x \times A_{BI}} \tag{56}$$

Em que x representa a distância percorrida pela barra de impacto desde o repouso até ao momento em que choca com a barra de entrada.

Assim, nesta fase, já se conhecem dados importantes como as tensões atuantes nas barras, o comprimento da barra de impacto, bem como, a pressão necessária para conferir uma certa velocidade à barra de impacto.

Por fim, assumindo taxa de deformação constante no provete, pode-se, de acordo com [4],

desenvolver a seguinte expressão que relaciona as constantes ε_{prov} e L_{prov}, definidas à priori, com o período da onda de deformação, T.

$$T = \frac{\varepsilon_{prov}\, L_{prov}}{-\,2\, c_{BE}\, \varepsilon_r} \tag{57}$$

Substituindo a expressão anterior em (45), obtém-se o comprimento da onda em função da extensão máxima desejada para o provete,

$$L_{onda} = \frac{\varepsilon_{prov}\, L_{prov}}{-\,2\, \varepsilon_r} \tag{58}$$

O que, de acordo com (45), define diretamente o comprimento da barra de impacto,

$$L_{BI} = \frac{L_{onda}}{2} \frac{c_{BI}}{c_{BE}} \tag{59}$$

Na Figura 3.2 encontra-se um fluxograma resumo do dimensionamento de uma barra de Kolsky. A numeração entre parêntesis refere-se à equação correspondente que permite calcular a variável em causa.

Em alternativa ao cálculo do sistema feito através da equação (56) (onde se considera a pressão constante), apresenta-se nas equações (60) a (67) o dimensionamento do sistema admitindo a utilização de pressão variável (método da conservação de energia) aplicada à barra de impacto.

$$\sum E_{potencial} = \sum E_{cinetica} \tag{60}$$

$$E_{cinetica} = \frac{1}{2}\, m\, v^2 \tag{61}$$

$$\begin{aligned}
E_{potencial} = \partial\, \mathrm{W} = P\, dV \;\Rightarrow W_{1-2} &= \int_{V_1}^{V_2} P\, dV = \int_{V_1}^{V_2} \rho\, R\, T\, dV = \\
&= \int_{V_1}^{V_2} \rho\, R\, T_1 \left(\frac{\rho}{\rho_1}\right)^{\gamma-1} dV = \\
&= \frac{R\, T_1}{(\rho_1)^{\gamma-1}} \int_{V_1}^{V_2} \frac{m}{V} \left(\frac{m}{V}\right)^{\gamma-1} dV = \\
&= \frac{R\, T_1}{(\rho_1)^{\gamma-1}} m^{\gamma} \int_{V_1}^{V_2} \left(\frac{1}{V}\right)^{\gamma} dV = P_1\, V_1{}^{\gamma} \left[\frac{V^{-\gamma+1}}{-\gamma+1}\right]_{V_1}^{V_2} \\
&= P_1\, V_1{}^{\gamma} \left[\frac{V_2^{1-\gamma} - V_1^{1-\gamma}}{1-\gamma}\right] = \\
&= \frac{P_1 V_2}{1-\gamma} \left[\frac{V_1^{\gamma} V_2^{1-\gamma}}{V_2} - \frac{V_1}{V_2}\right] = \\
&= \frac{P_1 V_2}{1-\gamma} \left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{\gamma}} - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma}\right] \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow W_{1-2} &= \frac{P_1 V_2}{1-\gamma} \left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{\gamma}} - \frac{P_2}{P_1}\right]
\end{aligned} \tag{62}$$

As expressões utilizadas em cálculos intermédios foram as numeradas de (63) a (66).

$$P = \rho\, R\, T \tag{63}$$

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{64}$$

$$\frac{T}{T_1} = \left(\frac{\rho}{\rho_1}\right)^{\gamma-1} \tag{65}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma} \tag{66}$$

Voltando ao ponto de partida, a equação (60), e aplicando à equação (62):

$$\begin{gathered}\sum E_{potencial} = \sum E_{cinetica} \Leftrightarrow \frac{P_1 V_2}{1-\gamma}\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{\gamma}} - \frac{P_2}{P_1}\right] = \frac{1}{2}\, m\, v^2 \\ \Leftrightarrow v = \sqrt{\frac{2}{m} \times \frac{P_1 V_2}{1-\gamma}\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{\gamma}} - \frac{P_2}{P_1}\right]}\end{gathered} \tag{67}$$

É ainda de salientar que em relação às unidades, a expressão imediatamente acima, apresenta o resultado correto.

Toda a formulação apresentada anteriormente, desde a equação (1) até à (67), pode também ser aplicada se o material a ensaiar for de tipo polimérico ou compósito, diferindo as dimensões da barra de impacto, da barra de saída, da barra de entrada e do provete e o valor de pressão necessária.

Para além do referido, os ensaios poderão ser realizados a alta ou baixa temperatura utilizando uma câmara ambiental.

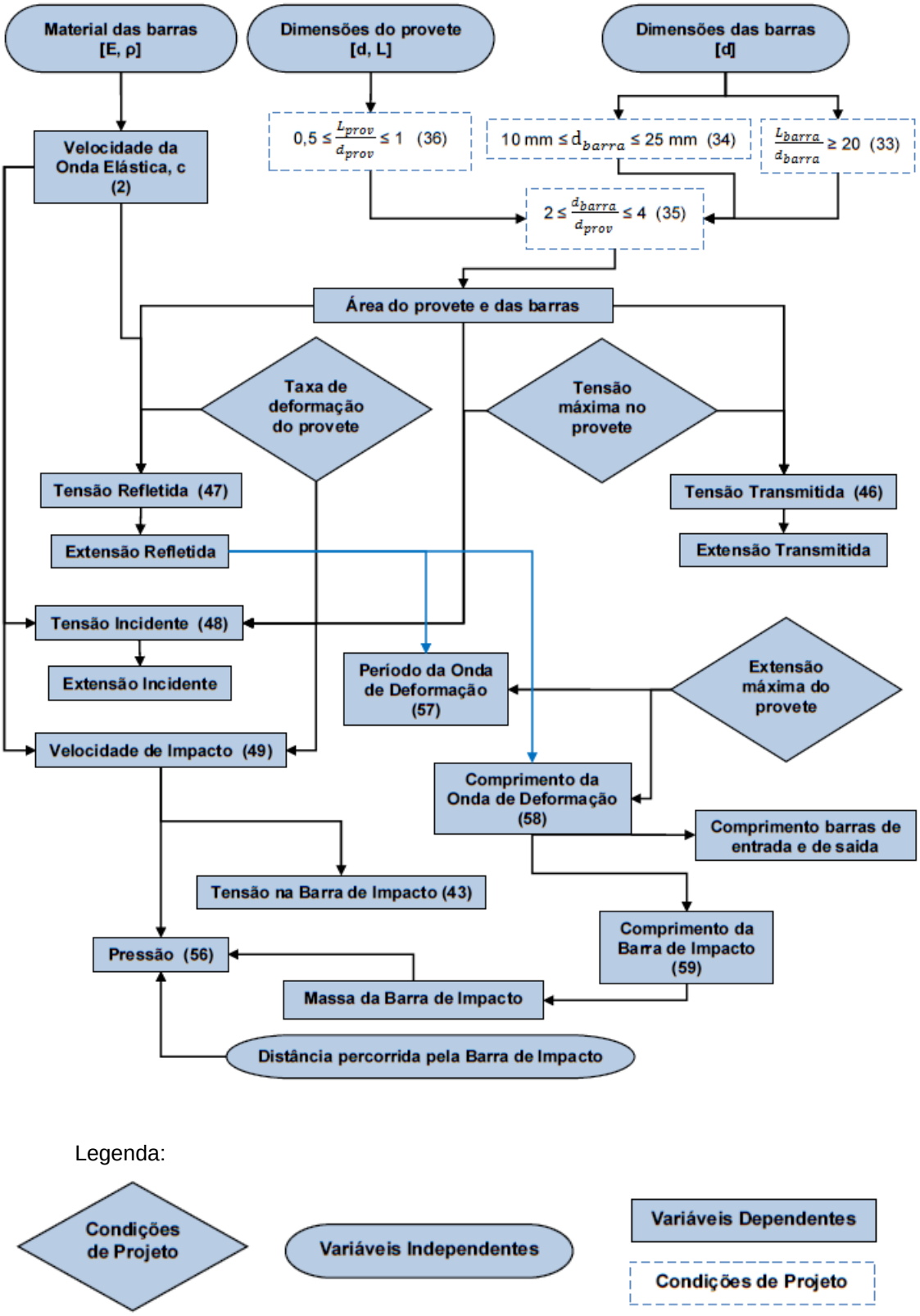


Figura 3.2 – Esquema síntese para o dimensionamento de uma Barra de Kolsky

3.3. Componentes Mecânicos

Nesta secção são apresentados os componentes que permitem a realização de um ensaio à compressão de um provete com elevada taxa de deformação através de uma Barra de Kolsky.

3.3.1. Estrutura de Suporte

O suporte de uma Barra de Kolsky é, normalmente, um ou mais perfis estruturais, colocados em série, cujo comprimento é determinado pelo comprimento total das barras de Kolsky. O suporte destes perfis deverá permitir a sua regulação em altura, de modo a ajustar o alinhamento das barras incidente, de entrada e de saída.

De facto, é essencial que toda a estrutura garanta o alinhamento preciso entre perfis e indiretamente entre as barras, para que o pressuposto de propagação de onda unidimensional seja válido, os ensaios ocorram como previsto, e a possibilidade de existência de ruído nos dados registados seja minimizada.

Um bom alinhamento entre o projétil e a barra de entrada durante o impacto também é importante, pois possibilita a geração de um pulso incidente com um perfil trapezoidal aceitável [4].

3.3.2. Guiamento das Barras

A ligação das barras à estrutura de suporte (perfis) pode ser feita por meio de chumaceiras (Figura 3.3), de modo a assegurar o alinhamento entre as barras e o provete, bem como o menor atrito possível. Para isso, é importante escolher um sistema mecânico que permita vários tipos de ajustamento e que a sua fixação seja também possível de ajustamento, se necessário, como é exemplificado na Figura 3.4.

A determinação do número de apoios necessários, n, para suportar cada barra é um processo iterativo, condicionado pelo posicionamento dessas chumaceiras, o qual pode ser definido pelo método de Airy [17] [18]. Segundo este método, o vão (s, Figura 3.3) entre os pontos de suporte deve ser escolhido de forma a que, quando a barra é carregada, as duas faces das extremidades da barra permaneçam verticais. O vão, s, é então dado por:

$$s = \frac{L}{\sqrt{n^2 - 1}} \tag{68}$$

Em que, L representa o comprimento total da barra. Na Figura 3.3 esquematiza-se as variáveis de (60), para o caso em que existem duas chumaceiras de suporte ($n = 2$).

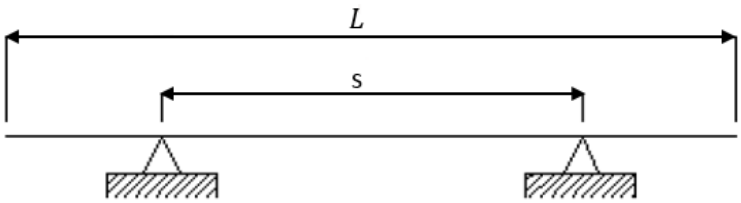


Figura 3.3 – Representação do posicionamento das chumaceiras de suporte (adaptado de [17])

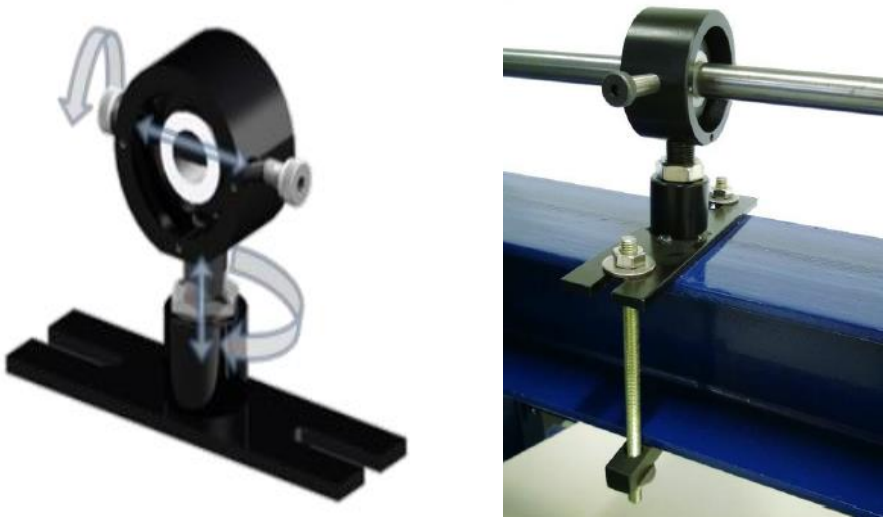


Figura 3.4 – Apoio para as barras desenvolvido por [19]

Um método de lubrificação, como o posteriormente descrito em 3.3.5. Guia da Barra de Impacto, deve também ser posto em prática, ou, como em Song et al., 2009, tendo atenção ao revestimento da barra ou da chumaceira, de modo a diminuir o coeficiente de atrito para um valor reduzido. No caso em estudo, sugere-se a utilização de um revestimento de Frelon®, um derivado do Teflon®, que garante um menor desgaste e um menor atrito.

3.3.3. Barra de Entrada e Barra de Saída

Conforme foi descrito em 2.3. Funcionamento e Formulação, a teoria de propagação de onda elástica unidimensional terá de ser respeitada de modo a conseguirem-se obter os resultados pretendidos, condicionando a escolha tanto do material das barras como das suas respetivas dimensões. Para que as barras não ultrapassem o estado elástico de deformação, sendo capazes de permanecer indeformadas ao impacto, requer-se que o seu material tenha elevada resistência mecânica, como são exemplo as ligas de titânio e alguns aços, os quais apresentam elevada tensão de cedência. Tipicamente, todas as barras são fabricadas a partir do mesmo material [4].

Como se viu anteriormente, o comprimento destas barras condiciona diretamente o período da onda de deformação, que, por sua vez, influencia a deformação que o provete poderá alcançar. Assim sendo, para que se atinjam elevadas taxas de deformação no provete, é necessário que a ordem de grandeza do comprimento da barra seja superior à ordem de grandeza do seu diâmetro. A relação entre o comprimento e o diâmetro destas barras condiciona também a propagação unidimensional da onda, e por isso, é imposta a condição de projeto (33).

Outra condição fundamental relaciona-se com a barra de entrada, sendo que o seu comprimento tem de ser pelo menos o dobro do comprimento da onda de deformação gerada pelo impacto, para que seja possível captar essa onda na sua totalidade.

3.3.4. Barra de Impacto

A resistência mecânica da barra de impacto deverá ser igual à das outras barras, mas nunca inferior, para que esta também não se deforme aquando do impacto. São, por isso, normalmente produzidas no mesmo material das barras de entrada e de saída e ter diâmetro idêntico às suas barras [3].

Quanto ao comprimento desta barra, verifica-se que não poderá ser superior a metade do comprimento das outras barras, garantindo desta forma que não existirá sobreposição de sinais durante os ensaios.

3.3.5. Guia da Barra de Impacto

Normalmente consiste num tubo dentro do qual viajará a barra de impacto. Este tubo serve não só para guiar a barra de impacto, como garante uma desejada expansão unidimensional do gás que acompanha a aceleração e o deslocamento da barra de impacto. O tubo e a barra de impacto têm de ter um ajustamento com folga de tipo deslizante justo, de forma a garantir um guiamento adequado e a minimizar a perda de propulsão [20].

O comprimento do tubo depende da distância que a barra de impacto tem de percorrer para atingir a velocidade necessária com uma certa pressão imposta. O material escolhido para o tubo de guiamento é, normalmente, um aço, sendo importante verificar se o tubo suporta as tensões induzidas devido à pressão interna imposta pelo gás. Neste sentido, importa calcular a espessura do tubo, a qual deve também servir para evitar a flecha excessiva do tubo a meio vão.

As superfícies de contacto entre a barra de impacto e o seu tubo de guiamento podem ser ligeiramente lubrificadas, com o intuito de diminuir o atrito e a consequente perda de energia. No entanto, um excesso de lubrificação pode levar a variações de velocidade indesejadas [20]. Outro modo utilizado para diminuir o atrito entre a barra de impacto e o tubo de guiamento consiste em revestir a superfície da barra de impacto com Teflon® [7].

Para efeitos de dimensionamento, pode-se considerar o tubo de guiamento como sendo um reservatório pressurizado, de eixo horizontal, de geometria cilíndrica, que tem de suportar as tensões devido ao disparo da barra de impacto [17]. Assim sendo, aplicando a norma ASME Sec. VIII, Divisão 1, a espessura, t, do tubo pode ser calculada através de (61):

$$t = \frac{P_i\, r_i}{S \times e - 0{,}6P_i} \tag{69}$$

onde P_i é a pressão interna, r_i o raio interior do tubo, e e é um fator de correção associado ao tipo de soldadura e à abrangência de inspeção das soldaduras realizadas (coeficiente de eficiência de soldadura); S é a tensão admissível de projeto dada por sua vez, por

$$S = \frac{\sigma_{ced}}{fator\ de\ segurança} \tag{70}$$

Note-se que r_i, o raio interior da guia, assume-se como sendo igual ao raio da barra de impacto.

3.3.6. Sistema de Acionamento

O sistema de acionamento será responsável pela movimentação da barra de impacto no interior do tubo de guiamento na Barra de Kolsky, sendo constituído por um reservatório pressurizado e uma válvula. O primeiro consiste num reservatório de gás comprimido, e a energia potencial desse gás será transformada em energia cinética conferindo velocidade à barra de impacto. A pressão de trabalho é determinada pelo material do provete que se pretende estudar e pela construção da barra de impacto.

Esse reservatório estará ligado ao tubo de guiamento da barra de impacto e entre estes existirá uma válvula que permitirá, ou não, a passagem de gás, possibilitando o controlo da velocidade da barra de impacto. Esta válvula terá de ter uma elevada velocidade de resposta.

O sistema de acionamento tem de ser um mecanismo estável, caracterizado por uma adequada repetibilidade e reprodutibilidade.

3.3.7. Sistema de Desaceleração

Depois do impacto, é importante imobilizar todo o sistema adequadamente, nomeadamente a barra de saída, para não haver reflexões que dêem origem a leituras erradas dos sinais extensométricos. Para dissipar a energia cinética que o sistema possui, podem ser utilizados vários métodos, tais como:

- Adição de massa na extremidade final da barra de saída [21];
- Utilização de tubo de guiamento da barra de saída com interior afunilado [20];
- Utilização de um amortecedor hidráulico de impacto [17];
- Existência de uma barra extra e de um batente [19].

3.3.8. Condicionador de Sinal Estrutural

Este condicionador de sinal estrutural pode também designar-se por filtro mecânico e em inglês denomina-se frequentemente por “Pulse Shaper”. É um pequeno disco feito de uma liga de alumínio, cobre, latão, aço inoxidável, ou outro material, que é aplicado na extremidade da barra de entrada que sofre o choque da barra de impacto (Figura 3.5). Atua ao ser deformado plasticamente, filtrando as altas frequências no pulso incidente, de forma a eliminar oscilações, o que irá modificar o perfil da onda incidente.

O propósito da sua utilização é promover a ocorrência de uma taxa de deformação constante no provete e/ou minimizar o fenómeno indesejado de dispersão nas curvas tensão-extensão do material [4] [9]. Por sua vez, uma taxa de deformação constante contribui para minimizar os efeitos de inércia em pequenas deformações. A sua utilização proporciona também o aumento do tempo que o pulso incidente demora a atingir o valor máximo, o que igualmente beneficia o equilíbrio de tensões no provete [4].

Contudo, é um elemento que nem sempre está presente numa barra de Kolsky. O seu emprego é decidido após a realização dos primeiros testes, analisando a consistência do valor da taxa de

deformação e a necessidade de correção de dispersões, dispersões estas que podem também ser corrigidas numericamente.

O material e as dimensões do condicionador de sinal estrutural dependem do ajustamento necessário das condições de teste iniciais. Pode ser utilizado um material mais macio ou mais duro dependendo das características do material em estudo [4]. O objetivo é fazer com que o perfil da onda incidente seja semelhante ao perfil da curva de tensão do provete, representada pela onda transmitida, sendo este um sinal que a taxa de deformação no provete é constante [4]. Sabe-se que com o aumento do diâmetro do filtro o fenómeno de dispersão é eliminado e o tempo que o pulso incidente demora a atingir o valor máximo aumenta [22].

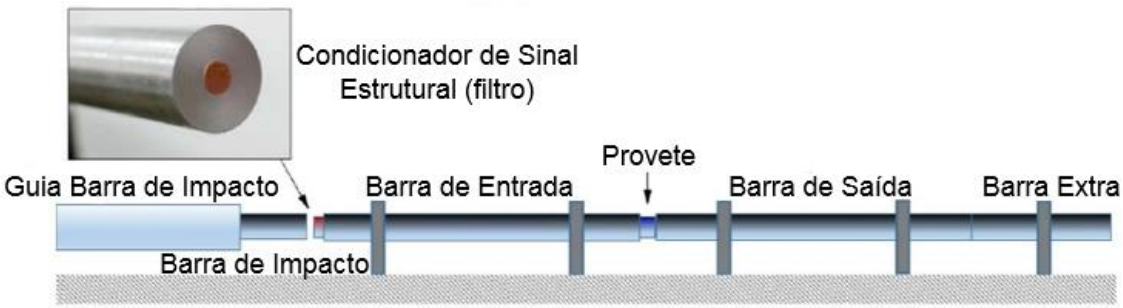


Figura 3.5 – Exemplo da aplicação de um condicionador de sinal [22]

É apresentado por Naghdabadi [23], as seguintes considerações para o dimensionamento condicionador de sinal estrutural:

- Para um condicionador estrutural, a tensão máxima no condicionador de sinal tem de ser superior à tensão de cedência do seu material, e normalmente o diâmetro do condicionador de sinal deve ser inferior ao diâmetro da barra;
- Ao determinar o diâmetro e a espessura do condicionador deve-se ter em conta a velocidade da barra de impacto, o seu comprimento e o diâmetro da barra de entrada.

É ainda recomendado:

- para provetes de material frágil, um condicionador de sinal com diâmetro relativamente pequeno e com maior espessura;
- para provetes de média a alta resistência, um condicionador de sinal com diâmetro e espessura relativamente grandes. É também adequado um condicionador de sinal com maior espessura e pequeno diâmetro para provetes de elevada resistência;
- para provetes de baixa resistência, um condicionador de sinal com diâmetro relativamente grande e espessura relativamente pequena.

Tendo em conta o acima exposto, um primeiro condicionador de sinal pode ser acoplado à barra de entrada e, se necessário, *a posteriori*, modificar o seu diâmetro e espessura de modo a aperfeiçoar os resultados obtidos.

A tensão máxima no condicionador de sinal, $\sigma_{cs,máx}$, é estimada por (63):

$$\sigma_{cs,máx} = 0{,}5\, \rho_{BE} C_{BE} V_{BI} \frac{A_{BE}}{A_{cs}} \tag{71}$$

3.4. Instrumentação

Nesta secção são apresentados os vários acessórios e instrumentos necessários para a recolha e gravação dos dados e resultados de cada ensaio. A instrumentação típica de uma Barra de Kolsky inclui extensómetros, um osciloscópio, amplificadores de sinal, um reservatório pressurizado para indução do disparo da barra incidente, um sistema de medição de velocidade e um sensor para medição de pressão.

3.4.1. Extensómetros

Os extensómetros são capazes de detetar a deformação de um objeto através da variação da resistência elétrica associada à deformação e é necessário um equipamento apropriado para a aquisição e condicionamento destes sinais. A leitura do efeito das ondas incidente, refletida e transmitida poderá ser feita através de extensómetros elétricos colados em locais adequados nas barras de entrada e de saída.

Para colar os extensómetros nas barras é necessário que a superfície destas esteja livre de defeitos e esteja quimicamente limpa. O posicionamento de um extensómetro depende sempre do que se pretende analisar. Tipicamente, numa Barra de Kolsky, são colocados dois pares de extensómetros: um par na barra de entrada e o outro par de extensómetros na barra de saída. Cada par fica alinhado com a direção longitudinal da barra e em posições diametralmente opostas (Figura 3.6), possibilitando o cancelamento do efeito da flexão que possa ser causada pelo desalinhamento entre as barras e observando-se assim apenas a leitura de extensões axiais. Quanto à colocação dos extensómetros relativamente ao comprimento da barra, o meio comprimento das barras é selecionado como o local ideal para a colocação dos extensómetros porque, no caso da barra de entrada, os pulsos incidente e refletido, propagados nas direções positiva e negativa, respetivamente, serão medidos pelo mesmo extensómetro sem sobreposição, a qual poderá acontecer apenas quando a duração do pulso incidente é inferior a $\frac{L}{c_{barra}}$ [15].

Note-se que na configuração ilustrada na Figura 3.6 estão ativos dois extensómetros idênticos colocados em braços opostos da Ponte de Wheatstone submetidos a extensões com o mesmo sinal, sendo esta configuração denominada por meia ponte. Este tipo de ligação (Figura 3.6) aumenta a sensibilidade da medição e a redução do efeito da variação da resistência com a temperatura, bem como o anulamento do efeito da flexão.

A consistência entre a amplitude do pulso incidente indicada pelos extensómetros e a calculada através da velocidade da barra incidente é indicativo de um alinhamento quase perfeito do sistema de barras. A oscilação nos valores de tensão indica a dispersão da onda devido ao efeito radial em barras longas. Esta dispersão conduz diretamente a oscilações na curva tensão extensão resultante, a qual precisará de ser corrigida numericamente, ou minimizada fisicamente com a introdução do condicionador de sinal estrutural [9].

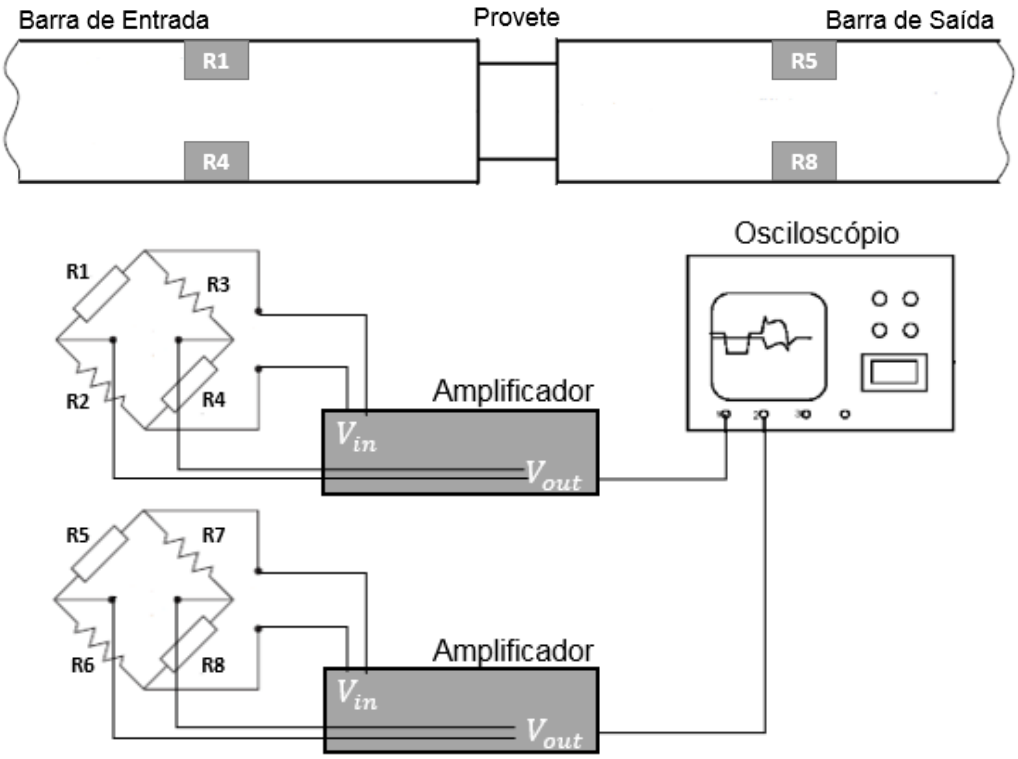


Figura 3.6 – Esquema de montagem do sistema de aquisição de dados (dimensões não estão à escala)

3.4.2. Osciloscópio

Um osciloscópio (Figura 3.7) transforma o sinal analógico recebido em sinal digital, ou seja, será responsável pela medição do sinal dos extensómetros, o qual é proporcional à extensão do provete. Com um programa informático adequado apresenta-se a curva tensão-extensão do material para as condições de ensaio.

A duração do sinal propagado nas barras, ou seja, o período T expresso, é inferior à milésima de segundo. Isto significa que, sendo proporcional a T, o sinal recebido dos extensómetros é da ordem dos milivolts. Só com a ampliação deste sinal é possível realizar a sua leitura com precisão [24], sendo também que a resposta em frequência do equipamento deverá ser no mínimo de 100 kHz, para que consiga captar um sinal transiente.

3.4.3. Amplificador

Normalmente numa Barra de Kolsky, a voltagem de saída dos extensómetros possui uma amplitude muito pequena (da ordem de milivolts); assim sendo, é necessário um amplificador de sinais para a obtenção de dados legíveis (Figura 3.7).

Figura 3.7 – Exemplo de osciloscópio (LeCroy WaveAce 2022) à esquerda e de amplificador (Vishay 2210A) à direita

3.4.4. Circuito de Disparo

Uma vez que todo o teste decorre em milissegundos, é necessário um sinal elétrico para iniciar todo o processo de aquisição de dados [19].

3.4.5. Sistema de Medição de Velocidade

É relevante conhecer a velocidade da barra de impacto antes da colisão, pois isto permite confrontar os valores determinados no dimensionamento com os valores obtidos na prática. Existe um período em que a barra se desloca a velocidade constante e é nesse período de tempo que deve ser feita a medição da mesma.

Existem vários métodos que permitem conhecer a velocidade da barra de impacto e, como expectável, eles implicam saber uma distância e um tempo. O requisito neste equipamento é que a resposta em frequência seja de, pelo menos, 100 kHz. Alguns dos equipamentos que permitem conhecer a velocidade da barra de impacto são:

- Sensores óticos – [7] [17] [19];
- Sensor de captação magnética – [14]
- Fotocélulas – [14]

3.4.6. Sistema de Medição de Pressão

Ao conhecer a pressão no depósito de gás comprimido é possível confrontar os valores da pressão com os da velocidade, a nível teórico e prático. Será também vantajoso pela possibilidade de calibração do reservatório pressurizado, fazendo pequenos incrementos de pressão e registando a velocidade da barra incidente para cada valor de pressão.

3.4.7. Sistema de Aquisição de Dados

É com um sistema de aquisição de dados que os sinais dos sistemas de medição e do circuito de disparo são registados e gravados. Este sistema deverá estar ligado a um computador que contempla os *softwares* adequados para a leitura dos diferentes dados.

3.5. Provete de ensaio

O material do provete será evidentemente aquele que se pretende estudar, mas definir a sua forma e dimensões é uma das fases mais importantes de um teste na Barra de Kolsky.

O primeiro pressuposto é que as dimensões do provete são inferiores às das barras. De forma a minimizar os efeitos indesejados da dispersão de onda e de inércia, quere-se que, no geral, as dimensões do provete sejam as mais pequenas possíveis.

Como sugerido pela literatura, e já referido no Capítulo 3 – Conceção de uma Barra de Kolsky existe uma relação entre o diâmetro e o comprimento do provete que se considera razoável neste tipo de ensaios à compressão, tanto para provetes cilíndricos, ou prismáticos.

As interfaces de contacto entre o provete e as barras de entrada e de saída devem ser lubrificadas, de modo a reduzir o atrito no movimento relativo das interfaces eliminando o efeito de barrilamento que poderia ocorrer no provete durante o ensaio [25].

Capítulo 4 – Desenvolvimento e Modelação de uma Barra de Kolsky

4.1. Definição do Caso de Estudo

Para efeito de dimensionamento de um ensaio envolvendo elevada taxa de deformação, são tidas em conta as características descriminadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Especificações relevantes para o dimensionamento

Tipo de teste	Compressão
Material a testar	Aço AISI 4130
Módulo de Young do material a testar	$E = 205\ GPa$
Massa volúmica do material a testar	$\rho = 7850\ Kg/m^3$
Temperatura de ensaio	Ambiente
Tensão máxima no provete	$1\ GPa$
Taxa de deformação mínima	$2000\ s^{-1}$
Taxa de deformação máxima	$5000\ s^{-1}$
Extensão máxima	$25\ \%$
Pressão máxima disponível	10 bar

Definiu-se que o material a estudar seria um aço AISI 4130 por ser um material diversamente utilizado na indústria metalúrgica, na construção naval e na aeronáutica [26]. O provete de ensaio terá uma forma cilíndrica com 10 milímetros de diâmetro e 10 milímetros de comprimento.

4.2. Componentes Mecânicos

Todas as dimensões apresentadas nesta secção foram determinadas através de um processo iterativo, de acordo com a formulação proposta nos capítulos 2.3 e 3, de forma a alcançar o objetivo definido na Tabela 4.1 e respeitando as condições de projeto impostas.

Na Tabela 4.2 são apresentadas as variáveis que foram ajustadas durante o processo iterativo, as quais influenciam os restantes valores.

Na Tabela 4.3 são expostos os valores obtidos para as variáveis dependentes, para os valores estabelecidos na Tabela 4.1 e na Tabela 4.2. Em anexo (Figura C.1) é apresentada a folha de cálculo que deu origem aos valores apresentados.

Tabela 4.2 – Descrição dos dados manipuláveis

Barras incidente, de entrada e de saída	Diâmetro	$20\ \mathrm{mm}$
	Módulo de Young	$\mathrm{E} = 205\ \mathrm{GPa}$
	Massa volúmica	$\rho = 7850\ \mathrm{Kg/m^3}$

Tabela 4.3 – Valores obtidos para as variáveis dependentes

	Incidente	Transmitida	Refletida
Tensão	$1253\ \mathrm{MPa}$	$250\ \mathrm{MPa}$	$-1003\ \mathrm{MPa}$
Extensão	$6{,}11 \times 10^{-3}$	$1{,}22 \times 10^{-3}$	$-4{,}89 \times 10^{-3}$

Velocidade da Barra de Impacto	$62{,}464\ \mathrm{m/s}$
Comprimento do pulso	$0{,}153\ \mathrm{m}$
Período do pulso	$0{,}000030\ \mathrm{s}$
Comprimento da Barra Incidente	$0{,}1\ \mathrm{m}$

Por fim, é necessário confirmar que as condições 33 a 36, esquematizadas anteriormente na Figura 3.2, e validadas na Tabela 4.4, são respeitadas.

Tabela 4.4 – Validação das condições de projeto

	Equação	**Mínimo**	**Máximo**	**Projeto**
$\frac{L_{barra}}{d_{barra}}$	(33)	20	-	75
d_{barra}	(34)	10 mm	25 mm	20 mm
$\frac{d_{barra}}{d_{prov}}$	(35)	2	4	2
$\frac{L_{prov}}{d_{prov}}$	(36)	0,5	1	1

4.2.1. Barra de Entrada e Barra de Saída

As barras de entrada e de saída têm secção circular com 20 mm de diâmetro e 1500 mm de comprimento (Tabela 4.4), permitindo valores de taxa de deformação no provete de ensaio iguais ou superiores a 2000 s^{-1}. O material de ambas as barras considerou-se o aço AISI 4140, descrito na Tabela 4.5, selecionado particularmente pelo valor de tensão de cedência elevado, valor este superior à tensão máxima experimentada pelas barras (1253 MPa), a qual se encontra especificada na Tabela 4.3.

Tabela 4.5 – Principais características das barras de entrada e de saída [27]

Material	AISI 4140
Tratamentos Térmicos	Normalizado a 870°C Recozido a 845°C Têmpera (banho de óleo) Revenido a 205°C
Módulo de Young	$\mathrm{E} = 205\ \mathrm{GPa}$
Massa volúmica	$\rho = 7850\ \mathrm{Kg/m^3}$
Tensão de cedência (σ_{ced})	1735 MPa
Tensão de rotura	1965 MPa
Ductilidade	11%

4.2.2. Barra de Impacto

O material da barra de impacto será o mesmo do das barras de entrada e de saída, descrito na Tabela 4.5. O seu diâmetro será igualmente de 20 mm e o seu comprimento igual a 100 mm (Tabela 4.3). A sua massa é de aproximadamente 247 gramas, sendo esta quantidade necessária aquando do cálculo da pressão.

A distância percorrida pela barra de impacto, desde o repouso até à colisão com a barra de entrada é de aproximadamente 2000 mm, como fundamentado pela Figura 4.1.

Para diminuir o atrito entre a barra de impacto e o tubo de guiamento optou-se por revestir a superfície da barra com politetrafluoretileno (PFTE), comercialmente conhecido por Teflon. A espessura deste revestimento será 0,025 mm [28].

4.2.3. Guia da Barra de Impacto

O diâmetro interior do tubo de guiamento da barra de impacto é determinado pelo diâmetro da barra de impacto, ou seja, será de 20 mm. Tendo em conta que o material escolhido para o tubo de guiamento é o aço AISI 4130 (Tabela 4.6), e que a sua tensão de cedência é igual a 435 MPa, a espessura mínima do tubo de guiamento foi calculada de acordo com a equação (61), apresentada em 3.3.5. As características do material, bem como as variáveis necessárias aos cálculos, encontram-se descriminadas na Tabela 4.6.

Conclui-se que a espessura mínima necessária para que o tubo resista aos esforços a que poderá estar sujeita é de 0,046 mm. Uma vez que a espessura mínima é reduzida, foi selecionada uma espessura igual a 5 mm, sendo assim o diâmetro exterior igual a 30 mm.
Sabendo que o comprimento da barra de impacto é de 100 mm e que a distância percorrida pela mesma são cerca de 2000 mm, o comprimento do tubo de guiamento será 2100 mm.

Tabela 4.6 – Principais características da guia da barra de impacto [29]

Material	AISI 4130
Tratamentos Térmicos	Normalizado a 870°C
Módulo de Young	$E = 205\ GPa$
Massa volúmica	$\rho = 7850\ Kg/m^3$
Tensão de Cedência do Material (σ_{ced})	435 MPa
Fator de Segurança	2
Tensão de Projeto (S)	217,5 MPa
Pressão Interna Máxima (P_i)	1 MPa
Raio interior (r_i)	10 mm
Coeficiente de eficiência de soldadura (e)	1
Espessura mínima (t)	0,046 mm

4.2.4. Sistema de Acionamento

Para propulsionar a barra de impacto, será utilizado o compressor disponível no DEMI – Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial. Trata-se do modelo SF4 da Atlas Copco cuja pressão de trabalho máxima são 10 bar (Figura 4.2). Este valor máximo disponível de pressão é a principal limitação imposta ao projeto, por isso é importante analisar como a velocidade da barra de impacto, a distância percorrida por essa barra e a pressão de trabalho estão relacionadas.
Sabendo que a velocidade máxima da barra de impacto terá de ser igual a 62,464 m/s (Tabela 4.3), e que a pressão máxima que o compressor disponibiliza são 10 bar, foi analisada qual a distância que a barra teria de percorrer até atingir a velocidade pretendida. Tal análise está representada na Figura 4.1, e apurou-se que se a barra de impacto percorrer uma distância de 2 metros terá de ser fornecida uma pressão de aproximadamente 7,7 bar para que sejam atingidos os 62,464 m/s (linha verde do gráfico da Figura 4.1).

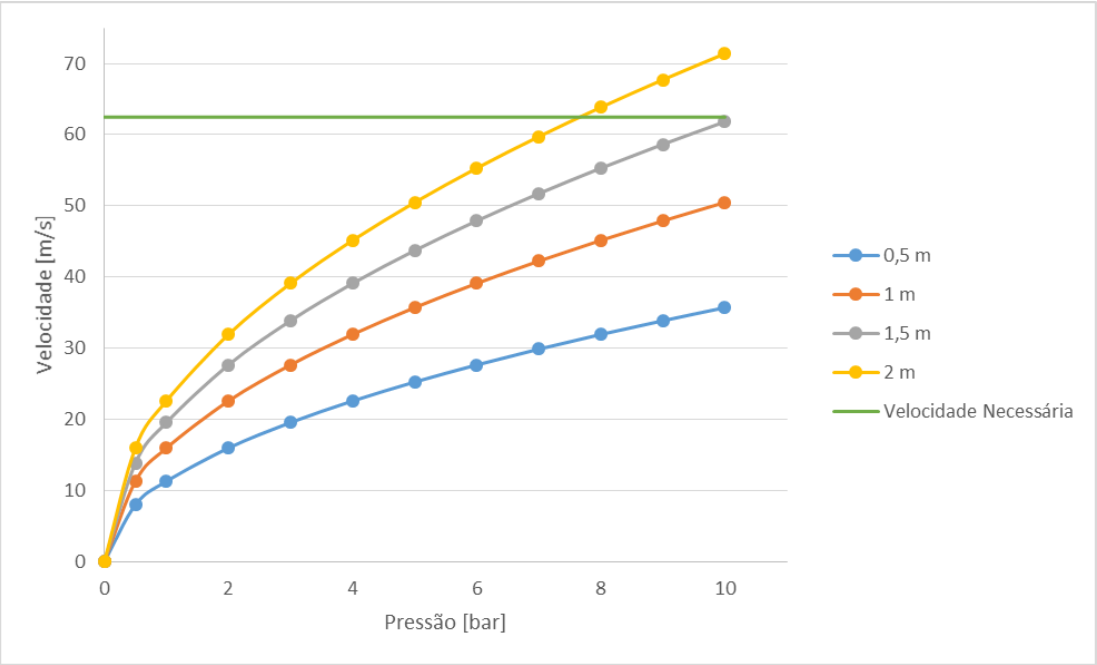


Figura 4.1 – Gráfico da pressão em função velocidade da barra de impacto para uma dada distância percorrida pela barra de impacto – equação (55)

De forma a controlar o fluxo de ar, integrou-se uma válvula solenóide, de duas vias, normalmente fechada e sentido de fluxo não reversível (Figura 4.2). A válvula é controlada através de um sinal elétrico, o que permite alterar o seu estado de fechada para aberta rapidamente.

Para que o ar existente na guia da barra de impacto possa escoar quando a barra de impacto regressa à posição inicial, foi integrada uma válvula de esfera que será aberta nessa situação.

Quanto à ligação entre estes elementos, ligação compressor – válvula solenóide e ligação válvula solenoide – guia da barra de impacto, esta é feita por intermédio de mangueiras, ligações de mangueira com rosca macho e uma união em T (Figura 4.3).

Figura 4.2 – Compressor Atlas Copco SF4 (esquerda), válvula solenoide (centro) e válvula de esfera (direita)

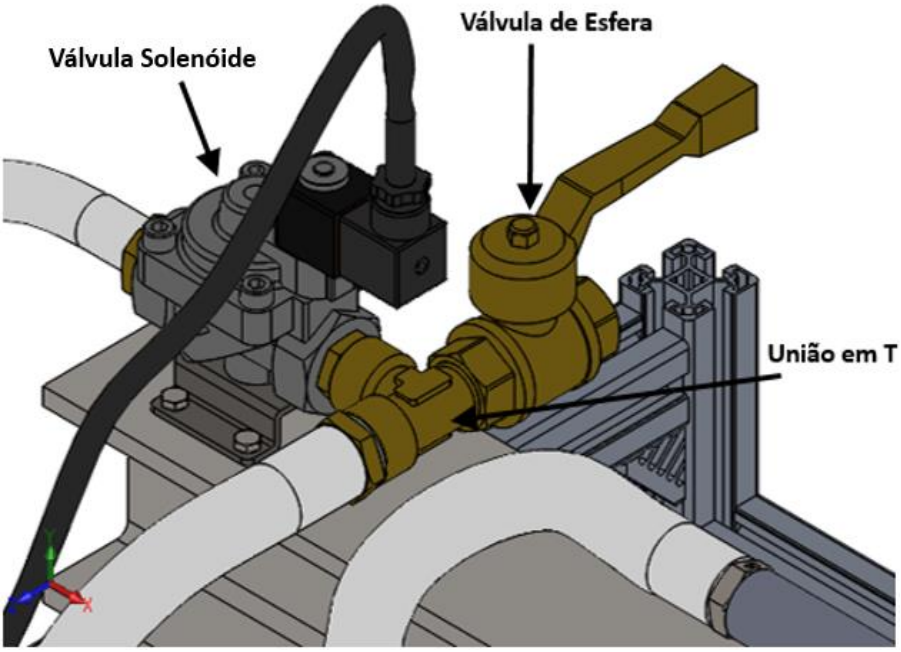


Figura 4.3 – Integração das válvulas no sistema

4.2.5. Suporte das Barras e do tubo de Guiamento

Para fazer o suporte das barras de entrada e de saída, bem como da guia da barra de impacto, serão utilizados casquilhos e chumaceiras da marca Igus.

A chumaceira linear flutuante drylin® R - RJUM-06 LL (Figura 4.4) permite compensar erros de paralelismo no eixo horizontal até 6 mm e fazer a compensação angular. Funciona sem necessidade de lubrificação e tem elevada capacidade de carga estática.

Para as chumaceiras do tubo de guiamento, com diâmetro exterior de 30 mm, o casquilho selecionado é o casquilho padrão JUM-01. Por sua vez, para as chumaceiras das barras de entrada e de saída, o mais apropriado é o casquilho linear iglidur® E7 (Figura 4.4) que foi desenvolvido especialmente para movimentos lineares, tendo boa durabilidade e reduzida taxa de desgaste em veios de aço, aço cromado e todos os tipos de aço inoxidável. A geometria estriada dos casquilhos permite uma fácil instalação, e têm um sistema de encaixe no alojamento com bloqueio axial devido a uma saliência de encaixe e proteção anti rotação através de um pino. O casquilho permite baixos coeficientes de atrito com as barras, sem ter necessidade de manutenção e de lubrificação. De referir ainda que a gama iglidur® é adequada para cargas dinâmicas elevadas e impactos.

De forma a respeitar o método de Airy, expressão (59), as chumaceiras das barras de entrada e de saída estarão espaçadas de 866 mm entre centros, assumindo as variáveis como L=1500 mm e n=2. Para o tubo de guiamento da barra de impacto as variáveis são L=2100 mm e n=2, pelo que, o espaçamento entre chumaceiras de apoio será s=1212 mm.

Figura 4.4 – Chumaceira drylin® R-RJUM-06 LL (à esquerda) e casquilho iglidur® E7 (à direita)

De forma a evitar o movimento axial do tubo de guiamento da barra de impacto, foi-lhe associada uma abraçadeira que será apertada no exterior do tubo e posicionada entre dois apoios em L, que por sua vez são fixos ao perfil estrutural por recurso a parafusos e porcas, como ilustrado na Figura 4.5.

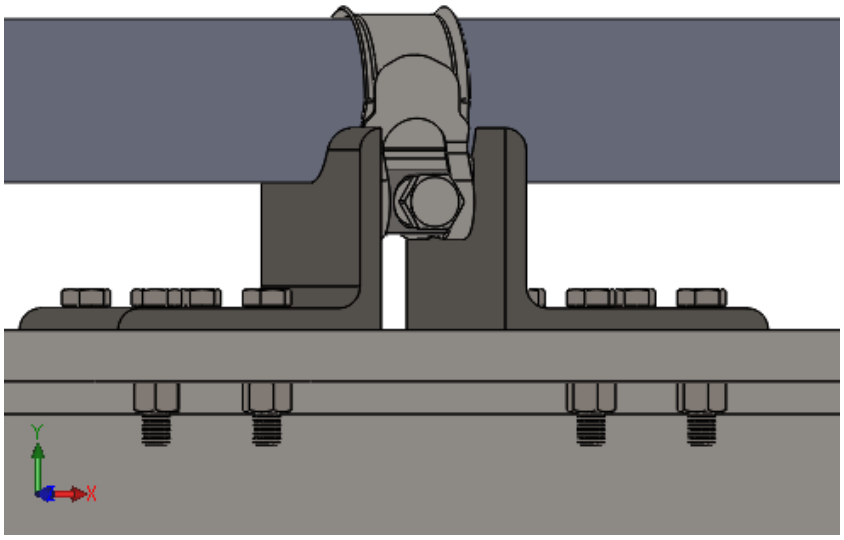


Figura 4.5 – Fixação da guia da barra de impacto

4.2.6. Estrutura de Suporte

Da estrutura de suporte faz parte um único perfil estrutural DIN HE100AX10.0 (Figura 4.6) onde estão apoiadas as chumaceiras. Este elemento terá de ser furado em pontos específicos de modo a permitir a fixação de alguns componentes e o seu comprimento total é 5600 mm.

Para suportar o perfil estrutural serão utilizados perfis de alumínio Bosch Rexroth (Figura 4.6). Os perfis Bosch selecionados têm perfil 40x40 e ranhura de 10mm, recomendada para aplicações que solicitem elevada estabilidade porque permite ligações de grande robustez. Serão necessários três comprimentos diferentes, nomeadamente de 500, 750 e 900 mm. Os elementos de 900 mm têm a particularidade de, numa das extremidades, possuir um acabamento

próprio para a adaptação de um pé roscado (Figura 4.7). Esse pé será de altura regulável permitindo ajustar algum desnivelamento existente. As ligações entre perfis Bosch e entre o perfil Bosch e o perfil estrutural são feitas com conectores selecionados da Bosch Rexroth, ilustrados na Figura 4.7.

Figura 4.6 – Perfil estrutural em I (esquerda) e perfil Bosch (direita) utilizados

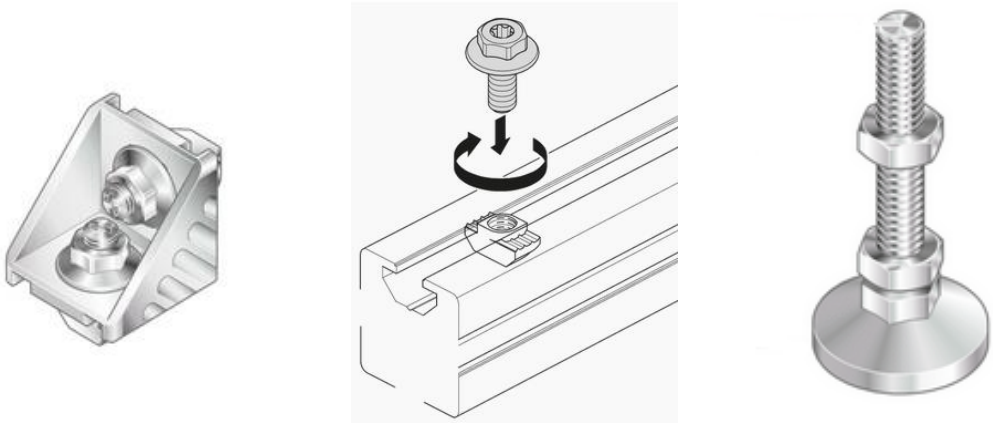


Figura 4.7 – Ligação entre perfis Bosch (à esquerda), ligação entre perfil Bosch e perfil estrutural (ao centro), pé nivelador (à direita)

Para segurança da instalação, é necessário confirmar que os perfis Bosch não excedem o limite de tensão e de deformação admitida (flecha) para o peso que têm de suportar. Para isso, recorre-se às Figura C.5 a Figura C.8, que são retiradas do catálogo Bosch, onde é dado o valor do módulo de Young (E=70000 N/mm^2), o momento de inercia da secção (I= 9,1 cm^4) e onde constam as seguintes expressões para a flecha (64) e para a tensão (65) num perfil Bosch apoiado nas extremidades e admitindo carga a meio vão

$$f_2 = \frac{F \times L^3}{48\, E \times I \times 10^4} \tag{72}$$

$$\sigma_2 = \frac{(m' \times g \times L + F) \times L}{4W \times 10^3} \tag{73}$$

Neste caso, a força, F, é o peso do perfil estrutural mais o peso dos acessórios apoiados na viga, perfazendo um total de aproximadamente 1300N. O comprimento, L, dos 8 perfis Bosch que vão

suportar esta carga é 500 mm. Admitindo que a carga é distribuída uniformemente pelos 8 perfis, o valor da flexão f_2 é de aproximadamente 0,066 mm e o valor da tensão σ_2 é igual a 4,62 MPa.

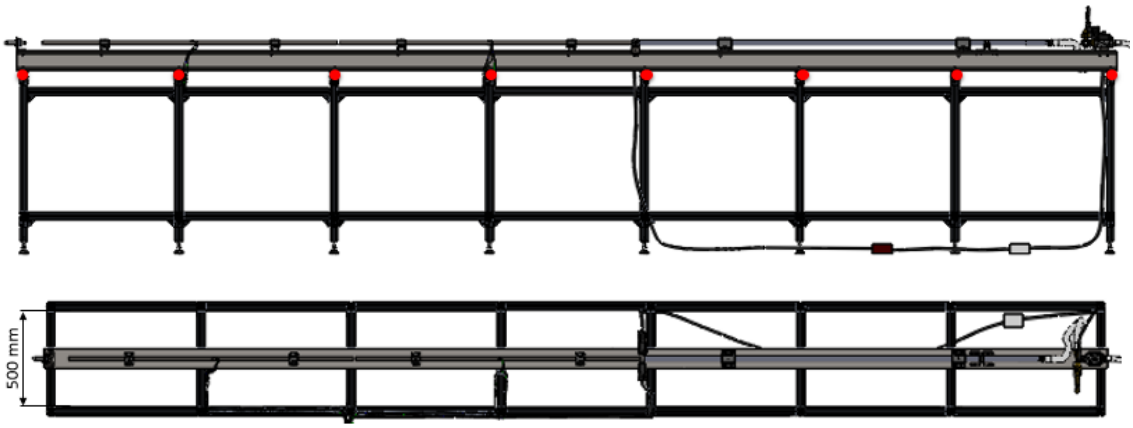


Figura 4.8 – Representação da distribuição do peso pelos perfis Bosch (pontos a vermelho)

4.2.7. Sistema de Desaceleração – Atenuador de Impacto

O método selecionado para desaceleração das barras foi a integração de um amortecedor (Figura 4.9), por ser uma opção simples e eficaz, que permite retirar rapidamente a velocidade das barras sem que estas sofram qualquer dano ou fiquem desalinhadas.

O amortecedor foi escolhido de acordo com a massa que teria de desacelerar e a velocidade dessa massa no momento do impacto.

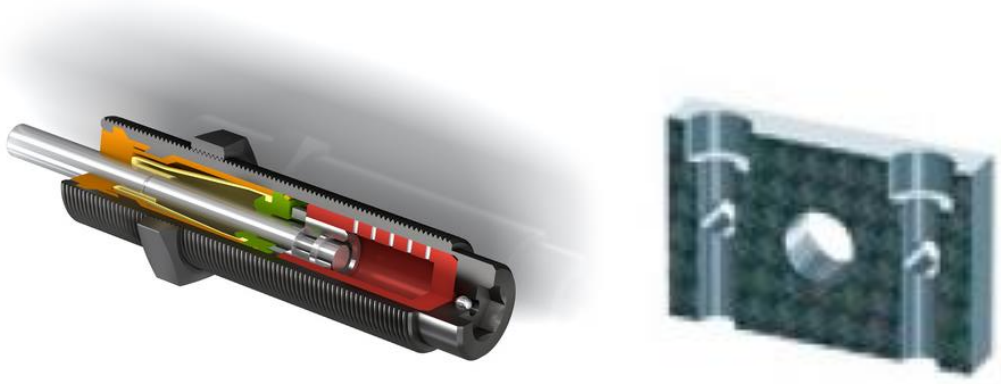


Figura 4.9 – Amortecedor ACE MC225EUM (esquerda) e sua unidade de fixação (direita)

4.3. Instrumentação

Foram escolhidos os extensómetros da marca Omega com a referência KFH-3-350-C1-11L1M2R. Estes extensómetros são adequados para o uso em aço e podem ser colados com adesivos de cura à temperatura ambiente (SG496, SG401) ou adesivos de cura com temperatura superior à ambiente (TT300).

O extensómetro é semelhante ao da Figura 4.10, sendo as dimensões da grelha elétrica 3 x 2 mm e da base 7,4 x 3,9 mm.

4.3.1. Osciloscópio

O osciloscópio selecionado é o WaveAce 2024 da LeCroy (Figura 4.10). Tem uma largura de banda de 200 MHz e 4 canais, sendo conectável via USB a um computador para recolha de dados.

Ao osciloscópio vão estar conectados os dois amplificadores e também o sensor de medição de velocidade.

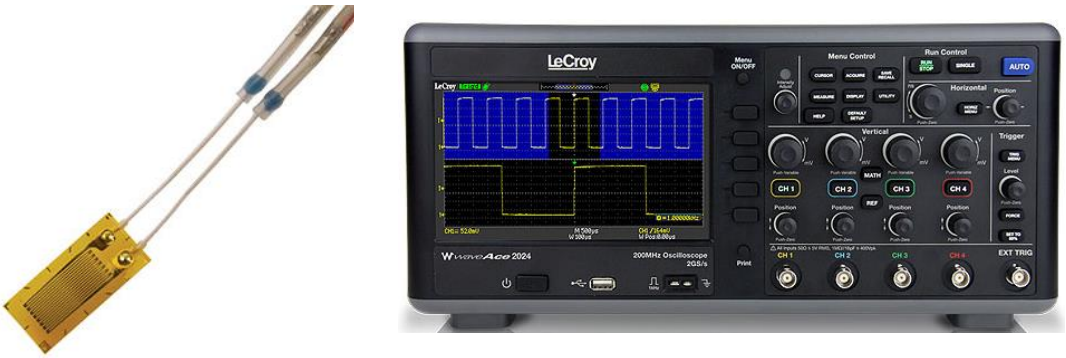


Figura 4.10 – Extensómetro Omega série KFH e Osciloscópio WaveAce 2024 da LeCroy

4.3.2. Amplificador

Para cada par de extensómetros é necessário um amplificador, ou seja, serão necessários dois amplificadores. O modelo escolhido foi 2210B da Vishay que tem uma resposta em frequência de 100 MHz. Segundo aconselhado pela marca, para o uso deste amplificador é necessário a utilização do “rack” 2260B, para fins de alimentação.

4.3.3. Circuito de Disparo

O circuito de disparo estará diretamente associado à válvula solenóide que é capaz de permitir ou impedir a passagem do ar comprimida para a guia da barra de impacto, quando acionada eletricamente. Com um conjunto de recetor e transmissor como o da figura Figura 4.11 é possível mudar rapidamente o estado da válvula, conforme exigido.

Figura 4.11 – Recetor e transmissor para a válvula solenoide

4.3.4. Sistema de Medição de Velocidade

Para a medição da velocidade foi selecionado um sensor ótico ODC1201 da Opto Control com um campo de medição de 30 mm, contendo assim toda a secção da barra de impacto com 20 mm de diâmetro. Este sensor é constituído por uma unidade fonte de luz e uma unidade recetora, à direita e à esquerda na Figura 4.12, respetivamente.

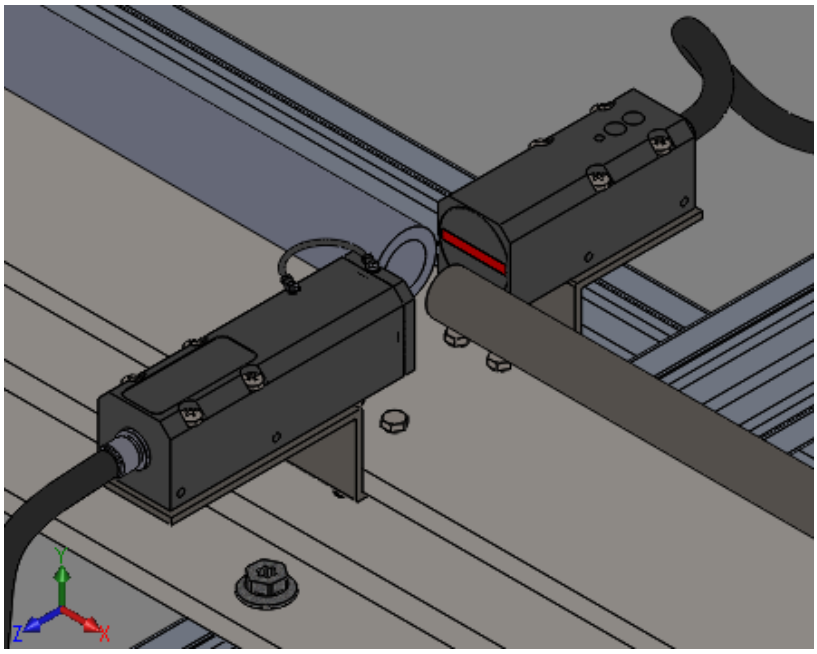


Figura 4.12 – Sistema de medição de velocidade integrado na montagem

O princípio de funcionamento é baseado na medição da quantidade de luz, em que uma luz laser vermelha é emitida sob a forma de uma cortina que é apontada para o recetor. No recetor, a luz é guiada através de vários filtros e lentes até um detetor fotossensível. A informação sobre a quantidade de luz detetada é fornecida como um sinal analógico.

4.3.5. Sistema de Medição de Pressão

Tendo em conta que o reservatório que está determinado ser utilizado já tem integrado um manómetro, é dispensável a integração de um outro sistema para verificação de pressão.

4.4. Estudo do Movimento

De forma a compreender o comportamento das barras, principalmente no momento do impacto e após o mesmo, procedeu-se ao estudo do movimento da barra de impacto, da barra de entrada, do provete e da barra de saída.

Este estudo foi feito através do programa informático "Motion Analysis" presente no *SolidWorks*, tendo sido estabelecidos os seguintes valores para os diversos parâmetros da análise: contacto entre os vários elementos; análise de 5000 *frames* por segundo; precisão igual a 0,0001; as definições avançadas de movimento apresentadas na Figura 4.13, e um motor definido por segmentos com os parâmetros apresentados na Figura 4.14.

Os parâmetros apresentados e utilizados para estudar o movimento das barras, são os mais adequados para um evento tão rápido como o impacto a cerca de 62 m/s que se pretendeu simular, com mudanças de movimento abruptas, e aqueles que efetivamente permitem que sejam calculadas as velocidades sem falhas no programa.

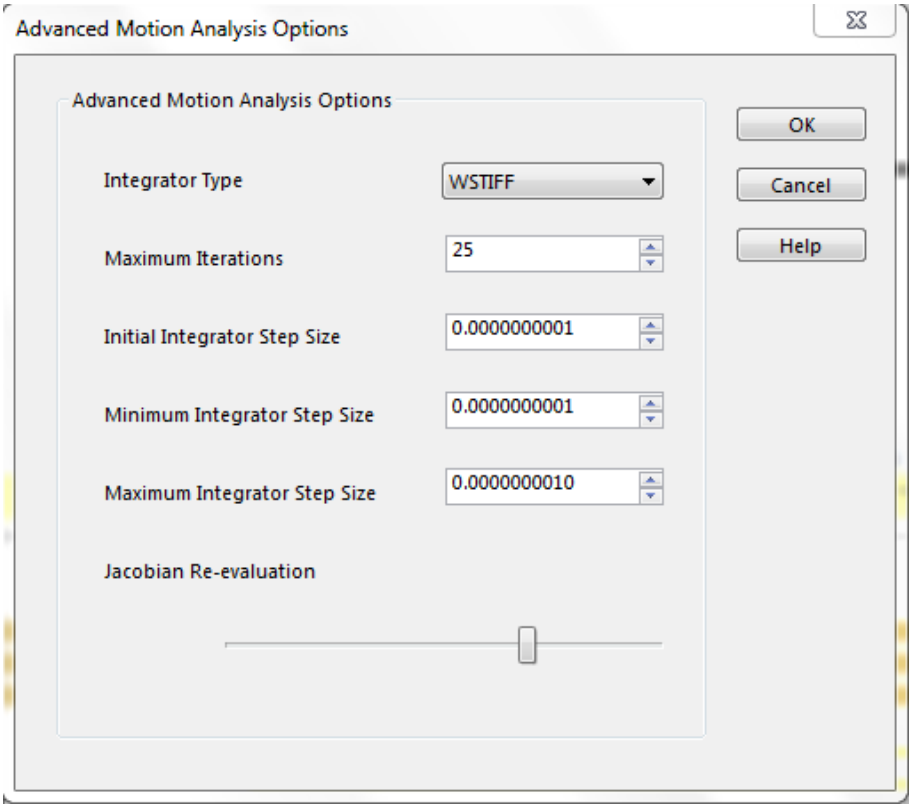


Figura 4.13 – Definições avançadas definidas para a análise do movimento

Sabe-se que a barra de impacto parte do repouso, que a velocidade a atingir é 62,464 m/s e que a barra percorrerá uma distância de cerca de 2 metros até dar-se a colisão.

Portanto, tal como exibido na Figura 4.14, foi definido que até aos 0,1 segundos o motor permaneceria em repouso, dos 0,1 aos 0,16 segundos irá acelerar até atingir 62,464 m/s, e dos 0,16 aos 0,17 segundos irá reduzir a velocidade até ao repouso, ou seja, aos 0,17 segundos o motor parará. A definição deste motor não implica a sua existência no projeto. Trata-se de um motor fictício, associado à barra de impacto, que indica o movimento que essa barra terá. Note-se que na definição do motor o programa não permite uma precisão superior a 2 casas decimais.

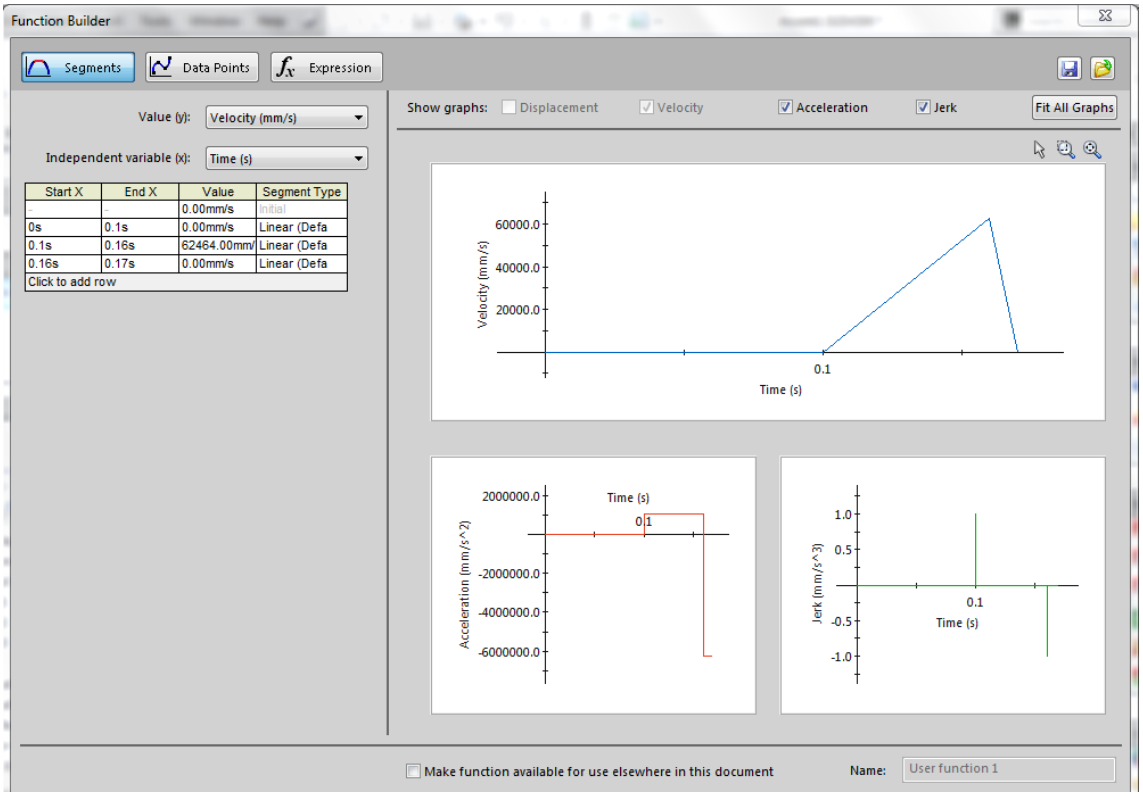


Figura 4.14 – Características do motor definido

Foi estabelecido que seria estudado o movimento durante 0,5 segundos. Obtêm-se então os gráficos com a velocidade em função do tempo decorrido desde o início do teste.

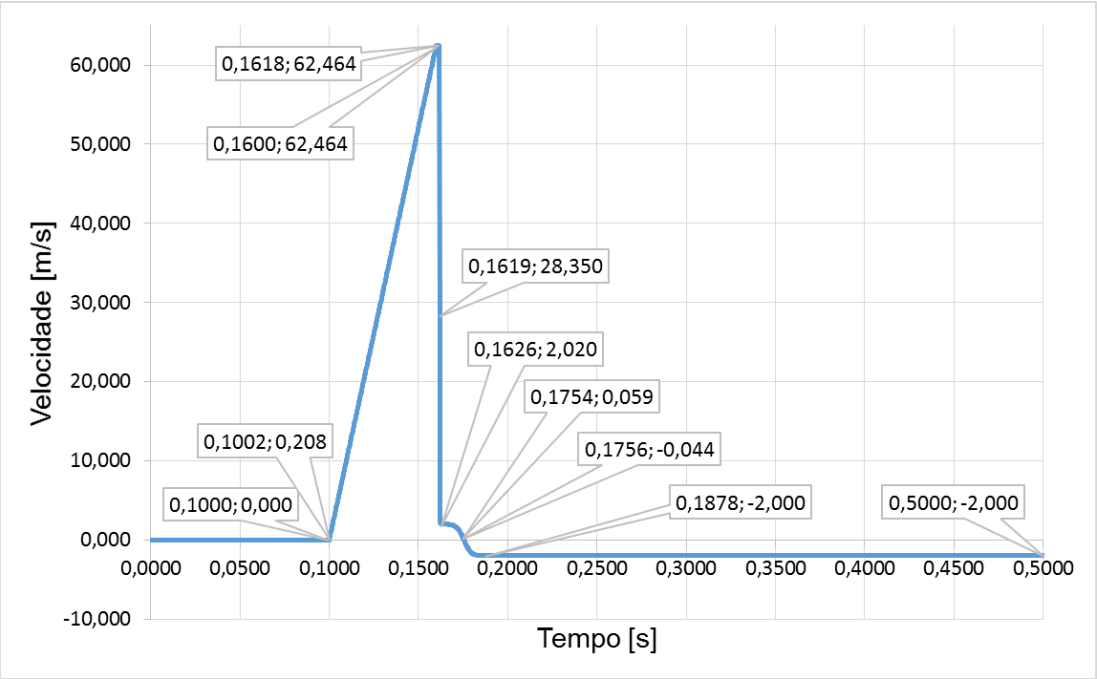


Figura 4.15 – Gráfico velocidade-tempo para a barra de impacto

A Figura 4.15 diz respeito à barra de impacto que, tal como foi definido, permanece em repouso até ao segundo 0,1 e aos 0,16 segundos atinge a velocidade 62,464 m/s. Entre o segundo 0,1618 e o 0,1619 dá-se a colisão entre a barra de impacto e a barra de entrada, e nesse instante a barra de impacto transfere a sua energia, perdendo velocidade instantaneamente. Entre os segundos 0,1754 e 0,1756 a barra de impacto inverte o sentido do seu movimento, e a partir dos 0,1878 mover-se-á no sentido negativo com velocidade constante igual a 2 m/s.

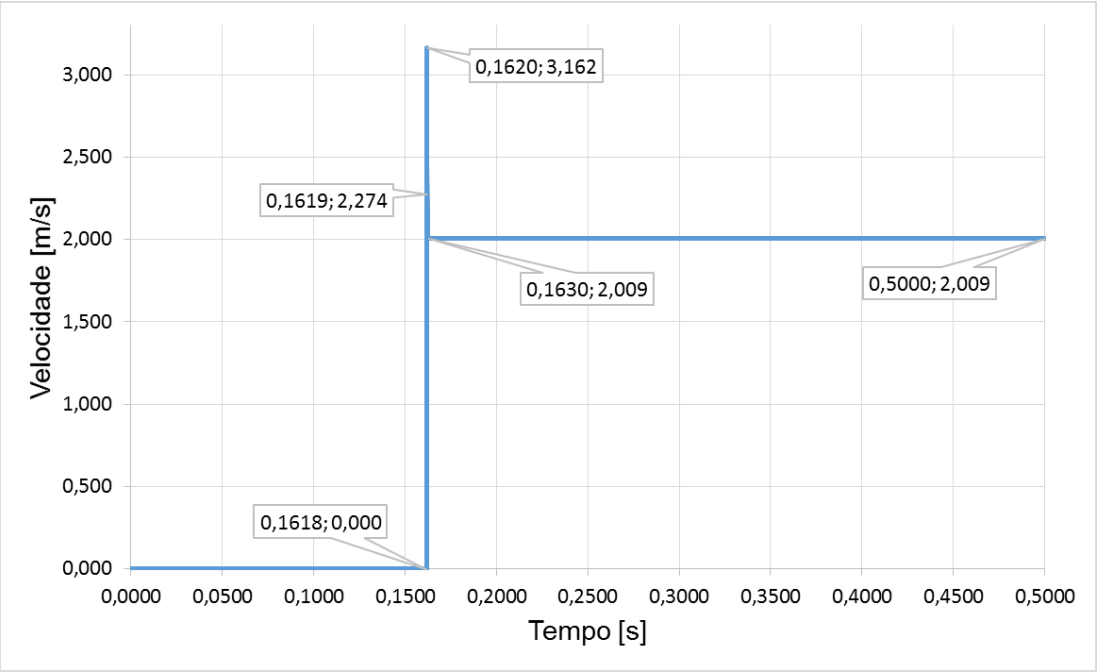


Figura 4.16 – Gráfico velocidade-tempo para a barra de entrada

Na análise à Figura 4.16, a qual diz respeito à barra de entrada, destaca-se o instante em que se dá o impacto. Depois do instante 0,1518 a barra de entrada recebe uma grande quantidade de energia, acelerando repentinamente. Ao segundo 0,1630 a barra de entrada já estabilizou o seu movimento e permanece em velocidade constante igual a 2,009 m/s até aos 0,5 segundos.

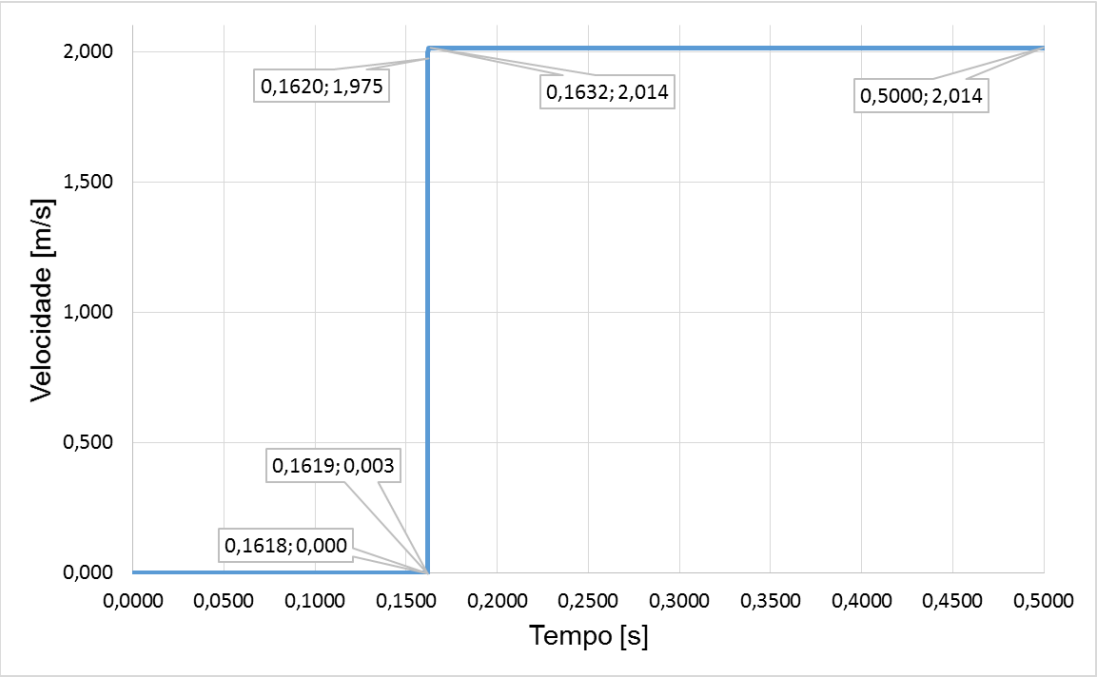


Figura 4.17 – Gráfico velocidade-tempo para o provete

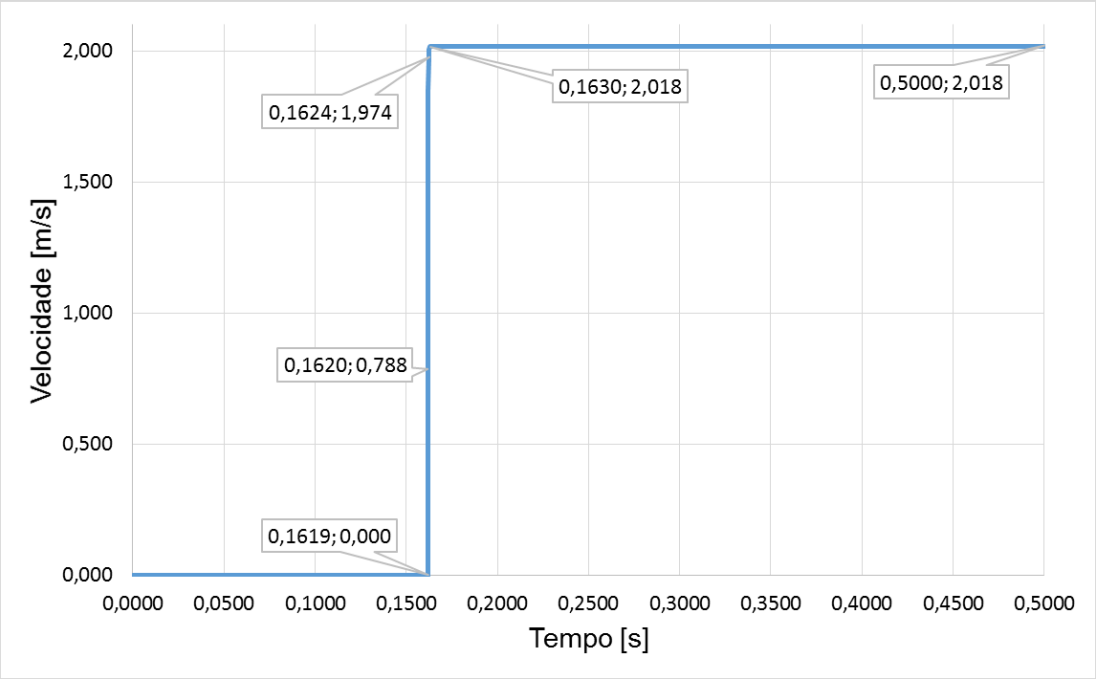


Figura 4.18 – Gráfico velocidade-tempo para a barra de saída

Em relação à Figura 4.17, a qual diz respeito ao provete, também se destaca o instante em que se dá o impacto, que neste caso será depois dos 0,1619 segundos, ligeiramente depois ao registado na barra de entrada. A partir dos 0,1632 segundos o provete já assume velocidade constante igual a 2,014 m/s.

Quanto à barra de saída, na Figura 4.18, esta inicia o movimento depois dos 0,1519 segundos, simultaneamente ao registado pelo provete. A partir dos 0,1630 segundos, a barra de saída desloca-se a velocidade constante igual a 2,018 m/s.

4.5. Orçamento para a Construção de uma Barra de Kolsky

Neste subcapítulo é apresentada a previsão da despesa para a construção da Barra de Kolsky descrita neste documento (Figura 4.19).

É de salientar que os preços apresentados são aqueles fornecidos pelas respetivas marcas ou representantes na data em que foram requisitados, podendo sofrer alterações. Na Tabela 4.7 não se consideram os custos de mão-de-obra nem os associados à maquinagem de componentes.

Tabela 4.7 – Descrição dos componentes e o seu custo unitário

Componente	Marca	Referência	Quantidade	Custo Unitário	Custo Parcial
Chumaceiras	Igus	RJUM-06-20 LL	4	107,80 €	431,20 €
Casquilhos	Igus	E7UM-01-20	4	6,09 €	24,36 €
Chumaceiras	Igus	RJUM-06-30 LL	2	131,71 €	263,42 €
Casquilhos	Igus	JUM-01-30	2	9,46 €	18,92 €
Extensómetros	OMEGA	KFH-3-350-C1-11L1M2R	4	112,00 €	448,00 €
Sensor de Velocidade	Micro-Epsilon	ODC1201-30	1	1951,25 €	1951,25 €
Cabos para sensor de velocidade	Micro-Epsilon	PC1200-5	2	35,10 €	70,20 €
Osciloscópio	Teledyne LeCroy	WaveAce 2024	1	1761,59 €	1761,59 €
Amplificador	Vishay	2210B	2	2102,00 €	4204,00 €
Rack	Vishay	2260B	1	2229,00 €	2229,00 €
Amortecedor	ACE	MC225EUM	1	100,00€	100,00 €
Sensor de Pressão	OMEGA	MMG1.0KV10P3C0 T3A5CE	1	531,03 €	531,03 €
Válvula Solenoide	Festo	VZWP-L-M22C-G34-250-3AP4-40	1	144,98 €	139,98 €
Controlador para Válvula Solenoide	------	-------	1	40,00 €	40,00 €

Válvula de esfera	Festo	QH-3/4	1	25,32 €	25,32 €
Perfil 40x40L	Rexroth Bosch	3 842 993 120/L	44	14,89 €	655,16 €
Perfil 40x40L M12	Rexroth Bosch	3 842 993 121/L	16	18,79 €	300,64 €
Porca em T N10	Rexroth Bosch	3 842 530 287	16	0,43 €	6,88 €
Parafuso com flange M8x20	Rexroth Bosch	3 842 541 409	16	0,36 €	5,76 €
Esquadro 40x40	Rexroth Bosch	3 842 529 383	88	3,89 €	342,32 €
Pé ajustável M12	Rexroth Bosch	3 842 352 061	16	4,33 €	69,28 €
Abraçadeira	Lifial	2AS18029	1	4,00 €	4,00 €
Ligação mangueira M20 1"	Etopi	E6234020	1	6,15 €	6,15 €
Ligação mangueira M13 3/4"	Festo	N-3/4-P-13-MS	1	11,69 €	11,69 €
Ligação mangueira M19 3/4"	Festo	N-3/4-P-19-MS	1	12,11 €	12,11 €
Ligação T	Festo	NPFC-T-2G34-R34-FMF	1	4,66 €	4,66 €
Ligação reta	Festo	NPFC-D-2R34-M	1	4,71 €	4,71 €
Tubo flex.	Festo	P-13-SW	2	11,18 €	22,36 €
Tubo flex.	Festo	P-19-SW	3	21,55 €	64,65 €
				TOTAL =	13748,64 €

Tendo em conta o custo unitário dos componentes descritos na Tabela 4.7, estima-se que o custo total para a execução do projeto apresentado seja cerca de 14000€.

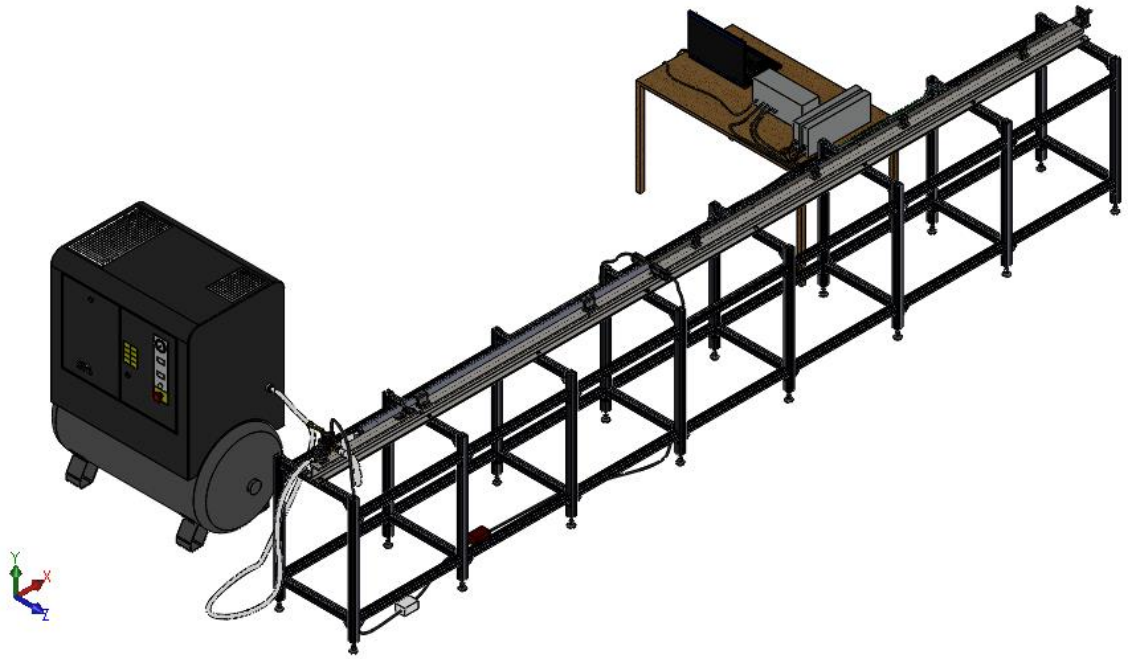


Figura 4.19 – Perspetiva isométrica do sistema de Barra de Kolsky modelado

Capítulo 5 – Conclusão e Sugestão para Trabalhos Futuros

5.1. Conclusão

O conhecimento do comportamento mecânico dos materiais é essencial para a sua utilização nas mais diversas aplicações. Assim sendo, o estudo dinâmico de materiais sujeitos a taxas de deformação elevadas através de um ensaio no dispositivo de Kolsky é recorrentemente utilizado para caracterizar esse comportamento.

O trabalho executado nesta dissertação ao nível de modelação e projeto foi efetuado, sendo possível, de imediato, proceder à sua implementação.

Foi projetado um dispositivo versátil que, com pequenas adaptações, permite testar diferentes materiais sob diferentes taxas de deformação.

A análise do movimento das diferentes barras e do provete, é uma mais-valia pois facilita a escolha dos demais componentes, e permite prever o momento da colisão, o trajeto e as velocidades das barras de impacto, de entrada e de saída, bem como do provete.

Foi possível apurar que o custo para aquisição dos componentes desta Barra de Kolsky seria cerca de 14000€. A escolha dos componentes foi feita com base numa boa relação qualidade preço.

5.2. Sugestão para Trabalhos Futuros

Se possível, pretende-se a montagem da Barra de Kolsky dimensionada no DEMI, sendo por isso apresentado o orçamento para aquisição dos elementos mais técnicos e dispendiosos.

Após a instalação do dispositivo de ensaios é necessário realizar algumas calibrações, como por exemplo: pressão *versus* velocidade da barra de impacto; alinhamento das barras; ou implementação de um condicionador de sinal.

Com pequenas manipulações, neste dipositivo, podem ser feitos uma vasta quantidade de testes:

- Variação do comprimento da barra de impacto para experimentar diferentes taxas de deformação;
- Variação do material a testar com, por exemplo, adaptação da pressão (velocidade da barra de impacto);

Pode ser estudada a adaptação deste dispositivo a ensaios de tração.

Pode ser também interessante a integração de uma câmara de alta velocidade, para avaliação do comportamento dos diferentes elementos, e particularmente do provete, de uma a diferente perspetiva.

Por fim, poderá ser interessante realizar um estudo numérico do sistema mecânico desenvolvido (provete e barras) recorrendo a um programa de elementos finitos, de modo a simular a propagação da onda de tensão e a calcular as tensões induzidas nos vários componentes.

Bibliografia

[1] A. E. Nolting, R. Arsenault, and M. Bolduc, “Increased accuracy of SHPB test apparatus to better evaluate naval steels,” *Procedia Eng.*, vol. 10, pp. 2268–2273, 2011.

[2] ASM Handbook Committee, *ASM Metals HandBook Volume 8 Mechanical Testing and Evaluation*. 2003.

[3] “http://www.emic.com.br/.” .

[4] W. W. Chen and B. Song, *Split Hopkinson (Kolsky) Bar: Design, Testing and Applications*, no. 1. Springer Science+Business Media, LLC, 2011.

[5] R. M. Davies, “A critical study of the hopkinson pressure bar,” 1948.

[6] A. Khosravifard, M. M. Moshksar, and R. Ebrahimi, “High strain rate torsional testing of a high manganese steel: Design and simulation,” *Mater. Des.*, vol. 52, pp. 495–503, 2013.

[7] B. Song, K. Connelly, J. Korellis, W.-Y. Lu, and B. R. Antoun, “Improved Kolsky-bar design for mechanical characterization of materials at high strain rates,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 11, p. 115701, 2009.

[8] K. T. Ramesh, *Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics*. 2008.

[9] D. J. Frew, M. J. Forrestal, and W. Chen, “Pulse Shaping Techniques for Testing Brittle Materials with a Split Hopkinson Pressure Bar,” 2000.

[10] J. M. C. da F. Justo, “Estudo do comportamento ao impacto de alta velocidade de estruturas em materiais compósitos,” Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia, 2005.

[11] Kolsky, “Stress Waves in Solids,” *J. Sound Vib.*, vol. 1, pp. 88–110, 1964.

[12] J. M. C. da F. Justo, “Estudo do comportamento ao impacto de alta velocidade de estruturas em materiais compósitos,” 1996.

[13] D. Jia and K. T. Ramesh, “A Rigorous Assessment of the Benefits of Miniaturization in the Kolsky Bar System,” *Exp. Mech.*, vol. 44, no. 5, pp. 445–454, 2004.

[14] F. Gallina, R. S. Birch, and M. Alves, “Design of a split hopkinson pressure bar,” *17th Int. Congr. Mech. Eng. São Paulo, SP*, 2003.

[15] H. Meng and Q. M. Li, “An SHPB set-up with reduced time-shift and pressure bar length,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 28, no. 6, pp. 677–696, 2003.

[16] M. a Kaiser, Dr. Alfred Wicks, Leonard Wilson, and Dr. William Saunders, “Advancements in the Split Hopkinson Bar Test,” 1998.

[17] S. A. Gebremeskel, N. Asija, A. Priyanshu, H. Chouhan, and N. Bhatnagar, “Design Customization and Development of Split Hopkinson Pressure Bar for Light and Soft Armour Materials,” vol. 14, no. 7, 2014.

[18] “Airy Points,” *Eng. Noteb.*, pp. 1–13, 2013.

[19] K. Young, “Development of a Tensile Split Hopkinson Pressure Bar Testing Facility,” University of Windsor, 2015.

[20] K. D. Robertson, S.-C. Chou, and J. H. Rainey, “Design and Operating Characteristics of

a Split Hopkinson Pressure Bar Apparatus," *Army Materials and Mechanics Research Center, Watertown, Massachusetts*. 1971.

[21] K. Al-Jubouri and R. Al-Kesyonnan, "The Design, Construction and Testing of Unique Operated Hopkinson Split Pressure Bar System," *J. Eng. Dev.*, vol. 19, no. 1, pp. 178–194, 2015.

[22] Z. Song, Z. Wang, H. Kim, and H. Ma, "Pulse Shaper and Dynamic Compressive Property Investigation on Ice Using a Large-Sized Modified Split Hopkinson Pressure Bar," *Lat. Am. J. Solids Struct.*, vol. 13, pp. 391–406, 2015.

[23] R. Naghdabadi, M. J. Ashrafi, and J. Arghavani, "Experimental and numerical investigation of pulse-shaped split Hopkinson pressure bar test," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 539, pp. 285–293, 2012.

[24] H. Kolsky, "An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading," *Proc. Phys. Soc.*, vol. 62, pp. 676–700, 1949.

[25] J. Esteves, "Projecto e Instalação de um Sistema de Barras de Hopkinson em Alumínio para Caracterização Dinâmica de Materiais Compósitos," Universidade de Coimbra, 2011.

[26] "http://www.astmsteel.com/product/4130-steel-aisi-25crmo4-7218-scm430/." .

[27] "http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=8e87bc1cf20343b985b1a46a1f1eb1c3." .

[28] "http://www.metcoat.com/ptfe-coatings.htm." .

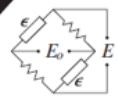
[29] "http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=m4130r." .

[30] Vishay, *Strain Gages and Instruments - Errors Due to Wheatstone Bridge Nonlinearity*. 2010, pp. 77–81.

Anexos

Anexo A: Análise dos Extensómetros

Tabela A.1 – Características para extensómetros ligados em meia ponte [30]

TABLE 1				
Bridge/Strain Arrangement (Note 1)	**Description**	**Bridge Output, E_o/E mV/V** (Notes 2, 3)	**Nonlinearity, η Where $E_o/E = K\epsilon \times 10^{-3}(1-\eta)$** (Notes 2, 3)	**Corrections** (Note 3, 4)
4 	Two active gages with equal strains of same sign — used on opposite sides of column with low temperature gradient (bending cancellation, for instance).	$\frac{E_o}{E} = \frac{F\epsilon \times 10^{-3}}{2 + F\epsilon \times 10^{-6}}$	$K = \frac{F}{2}$ $\eta = \frac{F\epsilon \times 10^{-6}}{2 + F\epsilon \times 10^{-6}}$	$\epsilon = \frac{2\epsilon_i}{4 - F\epsilon_i \times 10^{-6}}$

Notes:
1. $(R_1/R_4)_{\text{nom}} = 1$; $(R_2/R_3)_{\text{nom}} = 1$ when two or less active arms are used.
2. Constant voltage power supply is assumed.
3. ϵ and ϵ_i (strains) are expressed in microstrain units (in/in x 10^6) where ϵ_i is the strain indicated by your instrument and ϵ is the actual strain under a single active gage.
4. Expressions in this column correct for Wheatstone bridge nonlinearity (if present) and for the number of active gages in the circuit.

Através das expressões da *Tabela A.1*, é possível escrever uma função que define a extensão, ε, em função do fator do extensómetro, F, e do *output*, E_0/E.

$$\varepsilon = \frac{2}{\frac{E}{E_0} \times F \times 10^{-3} - F \times 10^{-6}}$$

A igualdade acima permite a interpretação do sinal dos extensómetros, em termos de extensão.

Anexo B: Folhas de Cálculo

Dados						
				Provete		
Variáveis	Barra Incidente	Barra de entrada	Barra de Saída	Cilíndrico		Unidades
Diâmetro	0,02	0,02	0,02	0,01		m
Comprimento				0,01		m
E - módulo de Young	2,05E+11	2,05E+11	2,05E+11	2,05E+11		Pa
ρ	7850	7850	7850	7850		Kg/m^3
Tensão máxima				1000000000		Pa
Área	3,14E-04	3,14E-04	3,14E-04	7,85E-05		m^2
c	5110,25	5110,25	5110,25	5110,25		m/s
β					1	
massa	0,247					Kg

Incógnitas					
	Incidente	Transmitida	Refletida		Unidades
Tensão	1,253E+09	2,500E+08	-1,003E+09		Pa
ε	6,112E-03	1,220E-03	-4,892E-03		
v - velocidade	62,464				m/s
L - pulso				0,15331	m
t - pulso				0,00003	s
L - BI	0,1000				m

Lprov/Dprov	Lbarras/Dbarras	Dbarra/Dprov
1	75,00	2,00
Taxa de deformação	5000	s^-1
Extensão Máx. Prov.	15%	
Deslocamento	2	m
Pressão	765719	Pa
	7,66	bar

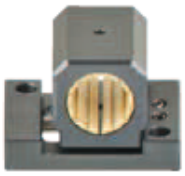
Figura B.1 – Folhas de cálculo com os dados para a modelação

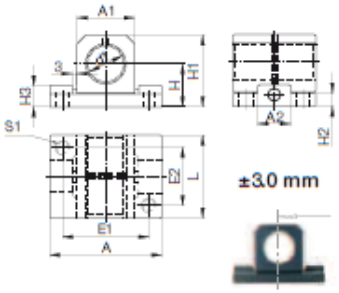
Anexo C: Produtos Selecionados de Catálogo

drylin® R pillow block | Product range

drylin® R round shaft guide systems

Floating pillow block





Order key

Type	Size	Options
R J U M-06-12 - LL		

Closed | igliduR® J | Liner | Metric | Long design | Diameter | Floating

- Compensation of parallelism errors up to 6 mm
- Quick assembly on raw profiles

[78] According to igus® testing method ▶ Page 924
[82] Design standards ▶ Page 878
Please note: Installation instructions ▶ Page 879
Floating bearing ▶ Page 878

Technical Data

Part No.	d1-Tolerance[78] [mm]	F max. static or dynamic[82] [N]	Weight [g]
RJUM-06-12 LL	+0.030 +0.088	560	50
RJUM-06-16 LL	+0.030 +0.088	920	80
RJUM-06-20 LL	+0.030 +0.091	2,100	130
RJUM-06-25 LL	+0.030 +0.091	3,550	280
RJUM-06-30 LL	+0.040 +0.110	5,300	430
RJUM-06-40 LL	+0.040 +0.115	8,000	850
RJUM-06-50 LL	+0.050 +0.130	12,500	1,550

Dimensions [mm]

Part No.	d1	H ±0.01	H1	A	E1 ±0.15	E2 ±0.15	S1	L	A1	A2	H2	H3
RJUM-06-12 LL	12	18	28	43	32	23	M5	32	20	13	6	11
RJUM-06-16 LL	16	22	35	53	40	26	M6	36	26	15	7	11
RJUM-06-20 LL	20	25	41	60	45	32	M8	45	32	19	7	12.5
RJUM-06-25 LL	25	30	50	78	60	40	M10	58	40	23	9	15
RJUM-06-30 LL	30	35	59	87	68	45	M10	68	48	28	10	15
RJUM-06-40 LL	40	45	76	108	86	58	M12	80	62	80	20	20
RJUM-06-50 LL	50	50	89	132	108	50	M16	100	78	100	24	24

Can be combined with:


RGA-01


RGA-03


RJUM-06

Also available with liners:


XUM-01


JUM-11


E7UM-01

3D-CAD files, prices and delivery time ▶ www.igus.eu/drylinR

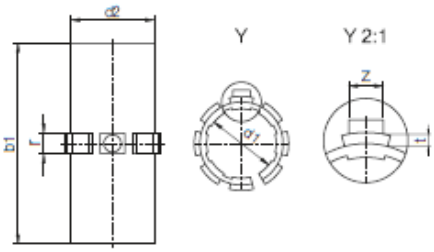
907

Figura C.1 – Informação catálogo Igus (chumaceiras)

drylin® R round shaft guide systems

drylin® R liners | Product range

Closed, long design for round shafts – made from iglidur® J (all-rounder)



Order key

Type	Size
J U M-01-10	

iglidur® J | Liner | Metric | Standard | d1

Inch — Imperial dimensions ▶ Page 1400

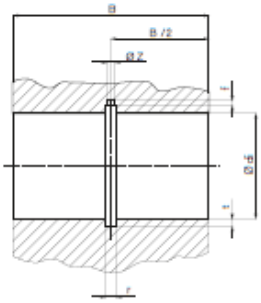
[79] According to igus® testing method ▶ Page 1000
Please note: installation instructions ▶ Page 945
min. -50 °C
max. +90 °C

Dimensions [mm]

d1	d1-Tolerance[79]	d2	b1	r	t	Z	Weight [g]	Part No.
10	+0.030 +0.070	12	28	3.0	0.8	2.5	1.10	JUM-01-10
12	+0.030 +0.070	14	31	3.0	0.8	3.0	1.50	JUM-01-12
16	+0.030 +0.070	18	35	3.5	0.8	3.5	2.20	JUM-01-16
20	+0.030 +0.070	23	44	5.0	0.8	3.5	4.90	JUM-01-20
25	+0.030 +0.070	28	57	5.0	0.8	4.0	8.23	JUM-01-25
30	+0.040 +0.085	34	67	5.0	0.8	4.0	14.95	JUM-01-30
35	+0.040 +0.085	39	69	5.0	0.8	4.0	18.20	JUM-01-35
40	+0.040 +0.085	44	79	6.0	1.3	5.0	23.16	JUM-01-40
50	+0.050 +0.150	55	99	7.0	1.3	6.0	45.35	JUM-01-50
60	+0.050 +0.150	65	124	8.0	2.5	6.5	70.00	JUM-01-60[79]

Housing bore for liner JUM-01 | dimensions [mm]

Shaft Ø	di H7	B h10	r +0.05	t +0.1	f +0.5	Z +0.2	Part No.
10	12	29	3.0	1.0	1.0	2.6	JUM-01-10
12	14	32	3.0	1.0	1.5	3.1	JUM-01-12
16	18	36	3.5	1.0	1.7	3.6	JUM-01-16
20	23	45	5.0	1.0	2.0	3.6	JUM-01-20
25	28	58	5.0	1.0	2.0	4.1	JUM-01-25
30	34	68	5.0	1.0	2.0	4.1	JUM-01-30
35	39	70	5.0	1.0	2.0	4.1	JUM-01-35
40	44	80	6.0	1.5	2.5	5.1	JUM-01-40
50	55	100	7.0	1.5	2.5	6.1	JUM-01-50
60	65	125	8.0	2.5	3.0	6.5	JUM-01-60[79]



[79] in two parts

Can be combined with:


RJUM-01/-03
TJUM-01/-03


RJUM-06/-06-LL

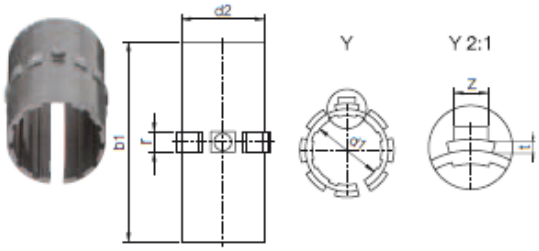

RJUM-01/-02

Figura C.2 – Informação catálogo Igus (revestimento chumaceira)

drylin® R round shaft guide systems

drylin® R linear | Product range

Long, closed design



Order key

Type	Size
E7 U M-01-10	

iglidur® E7 | Liner | Metric | Standard | Diameter

- Recommended in combination with steel stainless steel shafts
- Temperatures from –30 to +80 °C

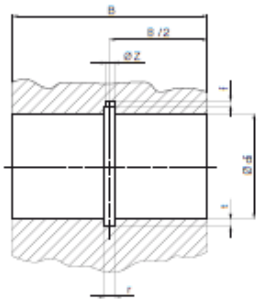
[78] According to igus® testing method ▶ Page 924
Cylindrical liner JSM ▶ Page 118
Please note: Installation instructions ▶ Page 879
Made from iglidur® E7 ▶ Page 1234

Dimensions [mm]

Part No.	d1	d1-Tolerance[78]	d2	b1	r	t	z	Weight [g]
E7UM-01-10	10	+0.030 +0.070	12	28	3.0	0.8	2.5	0.73
E7UM-01-12	12	+0.030 +0.070	14	31	3.0	0.8	3.0	1.01
E7UM-01-16	16	+0.030 +0.070	18	35	3.5	0.8	3.5	1.45
E7UM-01-20	20	+0.030 +0.070	23	44	5.0	0.8	3.5	3.25
E7UM-01-25	25	+0.030 +0.070	28	57	5.0	0.8	4.0	5.44
E7UM-01-30	30	+0.040 +0.085	34	67	5.0	0.8	4.0	9.88
E7UM-01-40	40	+0.040 +0.085	44	79	6.0	1.3	5.0	17.3
E7UM-01-50	50	+0.050 +0.100	55	99	7.0	1.3	6.0	–
E7UM-01-60[79]	60	+0.050 +0.100	65	124	8.0	2.5	6.5	–

Installation drawings housing bore for E7UM-01 | dimensions [mm]

Part No.	Shaft Ø	di H7	B h10	r +0.05	t +0.1	f +0.5	z +0.2
E7UM-01-10	10	12	29	3.0	1.0	1.0	2.6
E7UM-01-12	12	14	32	3.0	1.0	1.5	3.1
E7UM-01-16	16	18	36	3.5	1.0	1.7	3.6
E7UM-01-20	20	23	45	5.0	1.0	2.0	3.6
E7UM-01-25	25	28	58	5.0	1.0	2.0	4.1
E7UM-01-30	30	34	68	5.0	1.0	2.0	4.1
E7UM-01-40	40	44	80	6.0	1.5	2.5	5.1
E7UM-01-50	50	55	100	7.0	1.5	2.5	6.1
E7UM-01-60[79]	60	65	125	8.0	2.5	3.0	6.5



[79] in two parts

Can be combined with:


RJUM-01/-03
TJUM-01/-03


RJUM-06/-06-LL


FJUM-01/-02

Figura C.3 – Informação catálogo Igus (revestimento chumaceira)

Lifial
Indústria Metalúrgica de Águeda, Lda.

ABRAÇADEIRA SUPER DIN 3017

SUPER CLAMP DIN 3017

COLLIER TOURILLON DIN 3017

ABRAZADERA SUPER DIN 3017

Banda 18mm Parafuso M5 / Band 18mm Screw M5

Recommendation resistance - 8Nm

Und Cx	Medida Size Mesure	W1 Code / Price / Prix Código	€/100PCS	W2 Code / Price / Prix Código	€/100PCS	W4 Code / Price / Prix Código	€/100PCS	W5 Code / Price / Prix Código	€/100PCS
100	17-19	2AS18017	29,48	2AS18017I2	43,85	2AS18017I4	79,55	2AS18017I	92,66
100	20-22	2AS18020	29,70	2AS18020I2	45,08	2AS18020I4	82,77	2AS18020I	96,25
100	23-25	2AS18023	29,90	2AS18023I2	46,13	2AS18023I4	85,54	2AS18023I	99,32
100	26-28	2AS18026	30,10	2AS18026I2	47,25	2AS18026I4	88,95	2AS18026I	103,11
100	29-31	2AS18029	30,36	2AS18029I2	48,64	2AS18029I4	92,35	2AS18029I	106,89
100	32-35	2AS18032	36,49	2AS18032I2	51,03	2AS18032I4	95,15	2AS18032I	110,00
100	36-39	2AS18036	37,80	2AS18036I2	53,34	2AS18036I4	98,03	2AS18036I	113,20
100	40-43	2AS18040	39,08	2AS18040I2	55,19	2AS18040I4	100,91	2AS18040I	116,40
100	44-47	2AS18044	40,43	2AS18044I2	56,44	2AS18044I4	103,78	2AS18044I	119,58
50	48-51	2AS18048	41,57	2AS18048I2	58,04	2AS18048I4	106,66	2AS18048I	122,78

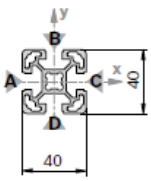
W1	Totalmente Zincado/ Fully Zinc Plated Steel / Entièrement en Acier Zingué / Acero Cincado
W2	Chapa Inox AISI 304, Taco e Parafuso Zincado / Band in Stainless Steel AISI 304 With Zinc Plated Bolt and Screw
W4	Chapa e Pf Inox AISI 304, Taco Latão Niquelado / Band and Screw in Stainless Steel AISI 304 With Nickel Plated Brass Bolt
W5	Chapa e Pf Inox AISI 316, Taco Latão Niquelado / Band and Screw in Stainless Steel AISI 316 With Nickel Plated Brass Bolt

Figura C.4 – Informação catálogo Lifial (abraçadeira)

2-26 **MGE 13.1** | Strut profiles

40x40L

A = 5,6 cm²
I_x = 9,1 cm4
I_y = 9,1 cm4
W_x = 4,5 cm³
W_y = 4,5 cm3
m = 1,5 kg/m



Cap	Color	ESD		No.
40x40 (1x)	Signal gray		100	3 842 548 746
40x40 (1x)	Black		20	3 842 548 747
Material:	PP			

Cap with hole	Color	ESD		No.
40x40 (1x)	Signal gray		20	3 842 548 782
40x40 (1x)	Black		20	3 842 548 783
Material:	PP			

40x40L		L (mm)	No.
1 pc		50 ... 6000	3 842 993 120 / L
1 pc	M12	60 ... 6000	3 842 993 121 / L
1 pc	M12 M12	110 ... 6000	3 842 993 122 / L
1 pc	M12 D17	90 ... 6000	3 842 993 123 / L
1 pc	D17	50 ... 6000	3 842 993 124 / L
1 pc	D17 D17	80 ... 6000	3 842 993 125 / L
1 pc	D17 D17V	80 ... 6000	3 842 993 126 / L
1 pc	D9,8 D9,8	80 ... 6000	3 842 993 129 / L
20 pcs		6070	3 842 529 339

Quick & Easy (p. 2-8, see fold-out section)

40x40L	3 842 993 724 / ...
Length L (mm)	50 ... 6000
Standard profile finishes (note minimum length, p. 2-25)	M12 / D9,8 / D17 / DB17 / F1 (A)[1]
Individual profile finishes (L_{max} = 5400 mm)	DI / DIS / MT / MTS / MI / MIS / DG[2]

[1] For the specified slots
[2] DG_{max} = 45°; L_{min1} / L_{min2} = 370 / 440 mm

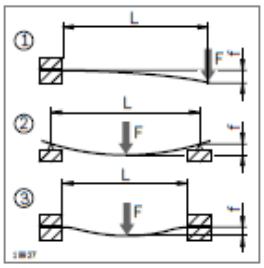
Figura C.5 – Informação catálogo Rexroth Bosch Group (perfil Bosch)

Technical data for strut profiles

EN AW – Al MgSi		Material designation according to DIN EN 573 for Rexroth strut profiles
EN AW – 6060		Material number according to DIN EN 573
R_m	= 245 N/mm²	Minimum tensile strength (in direction of pressure)
$R_{p0,2}$	= 195 N/mm²	0.2% proof stress (in direction of pressure)
A_5 A_{10}	= 10% = 8%	Ductile yield A_5 or A_{10}
E	= 70000 N/mm²	Modulus of elasticity E
75 HB		Brinell hardness
$\alpha_{(-50...+20\,°C)}$ $\alpha_{(+20...100\,°C)}$	= 21.8 x 10^{-6} 1/K = 23.4 x 10^{-6} 1/K	Longitudinal expansion coefficient

Figura C.6 – Informação catálogo Rexroth Bosch Group (perfil Bosch)

Profile deflection



$f_{①} = \frac{F \times L^3}{3\,E \times I \times 10^4}$ $f_{②} = \frac{F \times L^3}{48\,E \times I \times 10^4}$ $f_{③} = \frac{F \times L^3}{192\,E \times I \times 10^4}$	Profile deflection due to force F for static load cases ①②③
$f_{①} = \frac{m' \times g \times L^4}{8\,E \times I \times 10^4}$ $f_{②} = \frac{5 \times m' \times g \times L^4}{384\,E \times I \times 10^4}$ $f_{③} = \frac{m' \times g \times L^4}{384\,E \times I \times 10^4}$	Profile deflection due to the profile's own weight
$\sigma_{①} = \frac{(m' \times g \times L + F) \times L}{W \times 10^3}$ $\sigma_{②} = \frac{(m' \times g \times L + F) \times L}{4\,W \times 10^3}$ $\sigma_{③} = \frac{(m' \times g \times L + F) \times L}{8\,W \times 10^3}$	Control of max. occurring bending stress $\sigma_{b\,max}$
$\sigma_{b\,max} < \sigma_{b\,zul.}$! $\sigma_{b\,zul.} = \frac{R_{p0,2}}{S_{F\,erf.}}$	$S_{F\,req}$: Safety value required to avoid deformation (flow) $\sigma_{b\,zul}$: Max. permissible bending stress

f (mm)	W (cm³)
F (N)	E = 70000 N/mm²
L (mm)	m' (kg/mm); m' = m/1000; m (p. 2-4 ... 2-7)
I (cm⁴)	g = 9.81 m/s² ≈ 10 m/s²

Bosch Rexroth AG, 3 842 540 392 (2015-09)

Figura C.7 – Informação catálogo Rexroth Bosch Group (perfil Bosch)

μ	= 0.34	Poisson's ratio
E6/EV1 - 12 μm - 300 HV		Anodizing process – layer thickness – layer hardness

Permitted dimensional tolerance t (mm) for profiles from different deliveries

L_{max}	11-20	22.5-30	40	45-60
t	≥0.15	≥0.2	+0.6	≥0.3

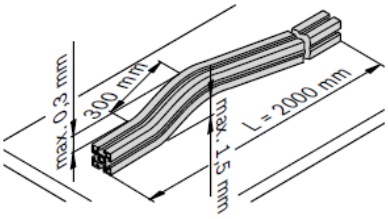
L_{max}	80	90	120	160
t	+0.8	≥0.4	+1.0	+1.6

L_{max}	180	270	360
t	≥0.6	≥1.0	≥1.5

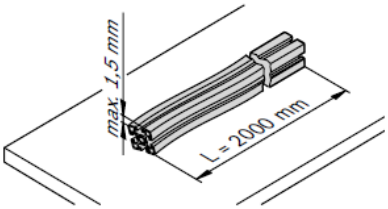
L2	6	8	10
t	+0.3	+0.3	+0.4

Ø	5.5	7.3	10	15
t	-0.1 +0.2	-0.1 +0.2	≥0.15	≥0.15

Deviation limits and form tolerances according to DIN EN 12020-2
Rexroth profiles generally fall well within the generally applicable tolerances specified in the standard. They are specifically defined for the individual products.

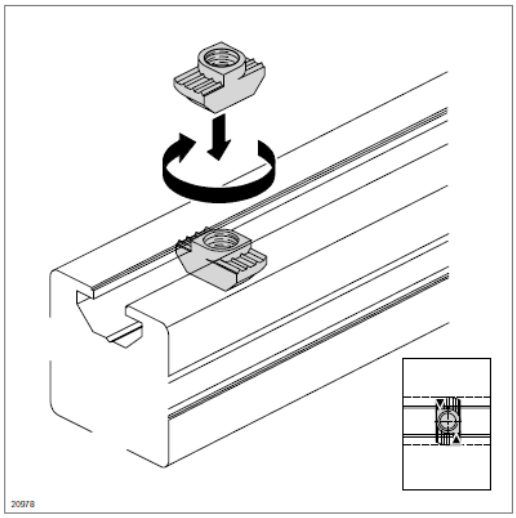


Longitudinal straightness tolerance of profile



Longitudinal torsional tolerance of profile

Figura C.8 – Informação catálogo Rexroth Bosch Group (perfil Bosch)

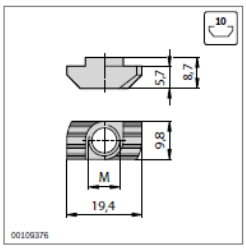


T-nut

- Standard element for secure, conductive connections
- Stop for correct positioning in the profile slot
- Stainless steel T-nut, e.g. for outdoor or cleanroom applications
- Profile machining: not required

Technical data (p. 19-5)

Accessories:
insulating cap (p. 3-5)



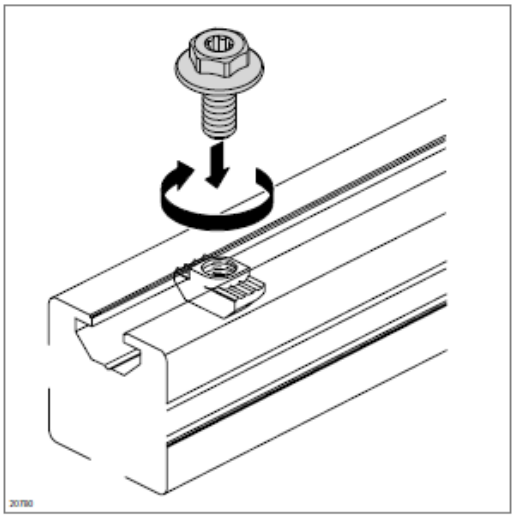
Slot	F_{max}
10 (M8)	6000 ... 18000 N[1]

[1] Depending on profile (p. 19-5)

T-nut, 10 mm slot	Slot	M	ESD		No.
Steel, galvanized	10	M4		100	3 842 530 281
		M5		100	3 842 530 283
		M6		100	3 842 530 285
		M8		100	3 842 530 287
Stainless steel	10	M4		100	3 842 536 606
		M5		100	3 842 536 605
		M6		100	3 842 536 604
		M8		100	3 842 536 603

Bosch Rexroth AG, 3 842 540 392 (2015-09)

Figura C.9 – Informação catálogo Rexroth Bosch Group (elemento de ligação)

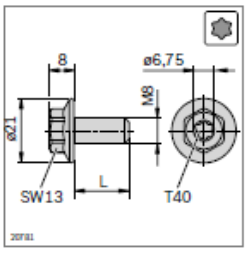


Collar screw

- Collar screw with multi-function head for tightening with ring/open-end wrench (WS 13) or Torx screwdriver (T40)
- Machine threading possible
- Preferably for bracket fastening
- Quick and simple assembly
- Excellent force transmission via broad flange
- ESD-capable
- Polymer spot for precise positioning of T-nut

Tool:
offset screwdriver (p. 14-6)

Accessories:
T-nut (p. 3-4)



Collar screw	M	L (mm)	ESD		No.
M8x18-SW13-T40 1)	M8	18		100	3 842 541 246
M8x20-SW13-T40 2)	M8	20		100	3 842 541 409

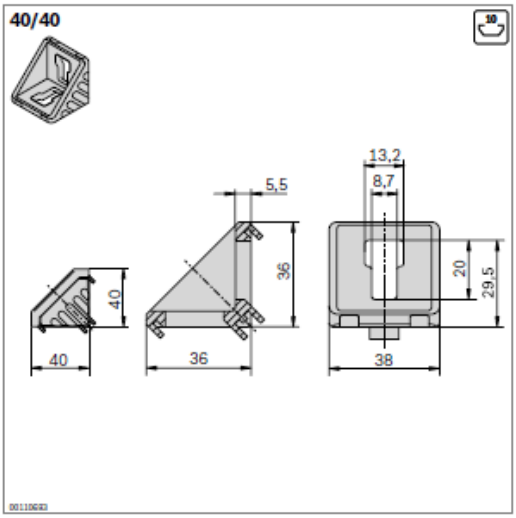
1) For 40/40 and 60/60 brackets

2) For all other brackets for 10 mm slot

Material: Steel, galvanized

Bosch Rexroth AG, 3 842 540 392 (2015-09)

Figura C.10 – Informação catálogo Rexroth Bosch Group (elemento de ligação)



40/40	Slot	ESD		No.	FS
Set (standard)	10 / 10		1	**3 842 529 383**	2xFS5
designLINE set	10 / 10		1	**3 842 551 603**	2xFS5
Bracket (standard)	10		100	**3 842 528 967**	
Cap, signal gray			100	**3 842 548 854**	
Cap, black			100	**3 842 548 855**	

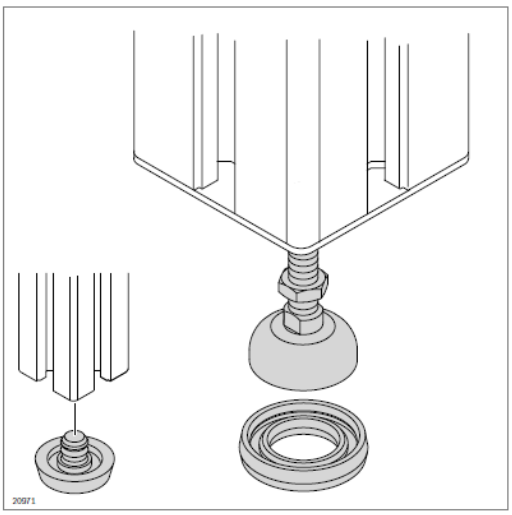
Material: Bracket: Diecast aluminum, vibratory ground
Bracket *designLINE*: painted (RAL 9006)
Cap: PP
Fastening material: steel, galvanized

Scope of delivery: Set incl. fastening material (FS)

Model	F_{max}	M_{max}	M_{max}	M_{max}
40/40	3000 N	55 Nm	145 Nm	35 Nm

Bosch Rexroth AG, 3 842 540 392 (2015-09)

Figura C.11 – Informação catálogo Rexroth Bosch Group (elemento de ligação)



Leveling foot, foot, damping ring

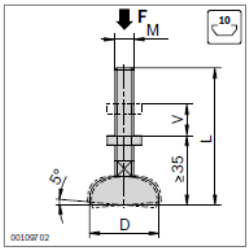
Leveling foot

- For compensating irregularities in the floor up to 5°
- Fully assembled spindle and base plate
- Profile machining: threading in central hole

Damping ring

- The electrically insulating damping ring prevents the transfer of vibrations and allows a defined conduction of voltages via a set of grounding components (p. 17-2)

Accessories:
bearing ring (p. 6-16); for when cover caps with a hole are used



Leveling foot	F (N)	M	D (mm)	L (mm)	V (mm)	ESD		No.
	10000	M12	44	85	30		20	3 842 352 061
	20000	M16	44	145	80		20	3 842 311 956
	10000	M12	44	160	80		20	3 842 536 470
	10000	M12	58	85	30		20	3 842 511 893
	20000	M16	90	85	20		20	3 842 311 950
	20000	M16	90	145	80		20	3 842 311 951
	20000	M16	90	200	135		20	3 842 527 186

Material: steel, galvanized

Figura C.12 – Informação catálogo Rexroth Bosch Group (pé nivelador)

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

TIPO	Pressão de trabalho máx.		Capacidade FAD*			Potência do motor instalado		Nível de ruído**	Peso	
	bar(e)	psig	l/s	m³/min	cfm	kW	hp	dB(A)	kg	lbs
SF 1-6/2"-6" (50/60 Hz)										
SF 1	8	116	2,9	0,17	6,1	1,5	2	53	120	265
	10	145	1,9	0,11	4,0	1,5	2	53	120	265
SF 2/SF 2+	8	116	4,2	0,25	8,9	2,2	3	55	125	276
	10	145	3,4	0,20	7,2	2,2	3	55	125	276
SF 4/SF 4+	8	116	6,7	0,40	14,2	3,7	5	57	133	293
	10	145	5,9	0,35	12,5	3,7	5	57	133	293
SF 6/SF 6+	8	116	9,8	0,59	20,8	5,5	7,5	59	157	346
	10	145	7,8	0,46	16,1	5,5	7,5	59	157	346
SF 8+-22+ (50/60Hz)										
SF 8+	8	116	13,4	0,80	28,4	8	10	63	372	820
	10	145	11,4	0,68	24,2	8	10	63	372	820
SF 11+	8	116	20,3	1,22	43,0	11	15	63	418	921
	10	145	15,0	0,90	31,8	11	15	63	418	921
SF 15+	8	116	26,4	1,58	55,9	15	20	63	550	1212
	10	145	23,0	1,38	48,7	15	20	63	550	1212
SF 17+	8	116	31,0	1,86	65,7	17	22	64	565	1245
	10	145	23,7	1,42	50,2	17	22	64	565	1245
SF 22+	8	116	40,8	2,45	86,5	22	30	65	650	1433
	10	145	30,0	1,80	63,6	22	30	65	650	1433
SFD 11+-22+ (50/60 Hz)										
SFD 11+	8	116	9,8	0,59	20,8	11	15	63	625	1380
	10	145	7,8	0,46	16,1	11	15	63	625	1380
SFD 15+	8	116	13,4	0,80	28,4	15	20	64	755	1665
	10	145	11,4	0,68	24,2	15	20	64	755	1665
SFD 22+	8	116	19,2	1,21	42,8	22	30	65	840	1855
	10	145	15,0	0,90	31,8	22	30	65	840	1855

SF SKID/TWIN										
Versões Skid										
SF 1	8	116	2,9	0,17	6,1	1,5	2	65	105	232
	10	145	1,9	0,11	4,0	1,5	2	65	105	232
SF 2	8	116	4,2	0,25	8,9	2,2	3	67	110	243
	10	145	3,4	0,20	7,2	2,2	3	67	110	243
SF 4	8	116	6,6	0,40	14,0	3,7	5	68	120	265
	10	145	5,6	0,34	11,9	3,7	5	68	120	265
Versões Twin – montado em reservatório duplex										
SF 6T	8	116	10,6	0,64	22,5	5,9	8	72	365	805
	10	145	9,0	0,54	19,1	5,9	8	72	365	805
SF 8T	8	116	13,2	0,79	81,1	7,4	10	73	375	827
	10	145	11,2	0,67	68,8	7,4	10	73	375	827

** Desempenho da unidade medido de acordo com a norma ISO 1217, Anexo C, última edição.*
*** Nível médio de ruído medido a uma distância de 1 m de acordo com a norma ISO 2151, tolerância de 3 dB(a).*
Os pesos das unidades Pack e montadas sobre o pavimento são apresentados no quadro.

Figura C.13 – Informação catálogo Atlas Copco (Compressor SF4)

DIMENSÕES

	C x L x A	
	mm	pol.
SF 1-6/2[+]-6[+]		
Pack e montado sobre o pavimento	760 x 690 x 840	29,9 x 27,2 x 33,1
Full-Feature e montado sobre o pavimento	1025 x 690 x 840	40,4 x 27,2 x 33,1
Pack e reservatório de 270 l	1275 x 690 x 1450	50,2 x 27,2 x 57,1
Full Feature e reservatório de 270 l	1275 x 690 x 1450	50,2 x 27,2 x 57,1
Pack e reservatório de 500 l	2055 x 690 x 1450	80,9 x 27,2 x 57,1
Full Feature e reservatório de 500 l	2055 x 690 x 1450	80,9 x 27,2 x 57,1
SF 8[+]-22[+]		
SF 8[+]-11[+]	1670 x 750 x 1230	65,7 x 29,5 x 48,4
SF 15[+]-22[+]	1628 x 750 x 1844	64,1 x 29,5 x 48,4
SFD 11[+]-22[+]		
SFD 11[+]-22[+]	1628 x 750 x 1844	64,1 x 29,5 x 48,4
SF 1-4 Skid/SF 6-8 Twin		
SF 1-4 Skid FM	800 x 600 x 540	31,5 x 23,6 x 21,3
SF 1-4 Skid TM	1267 x 600 x 1154	49,9 x 23,6 x 45,4
SF 6-8 Twin	2043 x 600 x 1154	80,4 x 23,6 x 45,4

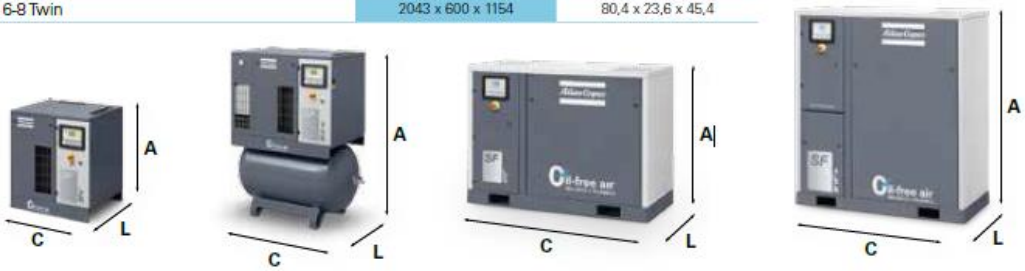
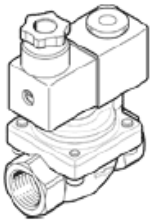


Figura C.14 – Informação catálogo Atlas Copco (Compressor SF4)

válvula solenoide
VZWP-L-M22C-G34-250-3AP4-40

Código da peça: 1489963

FESTO



Ficha técnica

Característica	Valores
Princípio construtivo	válvula de assento servopilotada
Tipo de acionamento	elétrico
Princípio de vedação	não temperado
Posição de instalação	Bobina de preferência em cima
Tipo de fixação	Montagem na tubulação
Conexão da válvula de processo	G3/4
Conexão elétrica	Conector design quadrangular conforme EN 175301-803 Forma A
Diâmetro nominal	25 mm
Função de válvula	2/2 vias, monoestável
Acionamento auxiliar manual	não disponível
Sentido do fluxo	não reversível
Meio	Ar comprimido conforme ISO 8573-1:2010 [7:4:4] Gases inertes Fluidos neutros Outros meios sob consulta
Pressão nominal da válvula de processo	40
Pressão diferencial	0,5 bar
Dados característicos da bobina	230 V CA: 50/60 Hz, potência de atração 10,5 VA, potência de retenção 7,6 VA
Classe de isolamento	H
Flutuações de tensão admissíveis	+/- 10 %
Tempo de abertura e fechamento	100%
Tipo de pilotagem	servopilotado
Pressão do meio	0,5 ... 40 bar
Viscosidade máx.	22 mm2/s
Temperatura do meio	-10 ... 80 °C
Temperatura ambiente	-10 ... 35 °C
Vazamento conforme EN 12266-1	A
Vazão Kv	8,2 m3/h
Vazão nominal padrão	8.750 l/min
Tempo de comutação, ligado	130 ms
Tempo de comutação, desligado	300 ms
Observações sobre material	Contém substâncias com LABS Conforme RoHS
Informação sobre material, corpo	Latão forjado CW617N
Informação sobre material, vedações	NBR
Informação sobre material, parafusos	Aço alta liga, inoxidável
Informação sobre material, parafuso	1.4301
Peso do produto	1.500 g
Classe de proteção	IP65
Certificação CE (veja Declaração de Conformidade)	Conforme Diretriz EU sobre baixa tensão
Classe de resistência à corrosão KBK	1 – Resistência à corrosão baixa

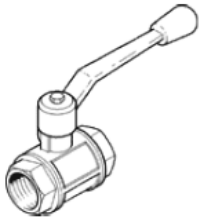
Figura C.15 – Informação catálogo Festo (Válvula solenoide)

válvula de esfera
QH-3/4

Código da peça: 9544

FESTO

Esse tipo é adequado para operação com vácuo.
com alavanca manual.



Ficha técnica

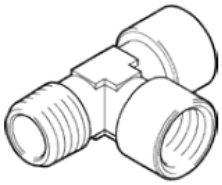
Característica	Valores
Função de válvula	2/2 vias duplo solenóide
Conexão pneumática 1	G3/4
Conexão pneumática 2	G3/4
Tipo de acionamento	manual
Tipo de fixação	Montagem na tubulação
Vazão nominal padrão	21.000 l/min
Diâmetro nominal	20 mm
Temperatura ambiente	-20 ... 180 °C
Informação sobre material, corpo	Latão
Meio operacional	Ar comprimido conforme ISO 8573-1:2010 [7:-:-] Água
Princípio de vedação	não temperado
Princípio construtivo	Válvula de esfera
Observação sobre meio operacional e do piloto	Permite operação com lubrificação (necessária para operações subsequentes)

Figura C.16 – Informação catálogo Festo (Válvula de esfera)

conexão roscada em T
NPFC-T-2G34-R34-FMF

Código da peça: 8030250

FESTO



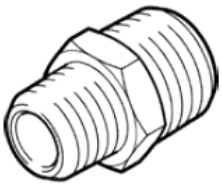
Ficha técnica

Característica	Valores
Informação sobre material, conexão roscada	Latão niquelado
Tamanho da embalagem	10
Pressão de trabalho	-0,95 ... 50 bar
Meio operacional	Ar comprimido conforme ISO8573-1:2010 [-:-:-]
Classe de resistência à corrosão KBK	1 – Resistência à corrosão baixa
Temperatura ambiente	-20 ... 150 °C
Peso do produto	186 g
Conexão pneumática 1	G3/4
Conexão pneumática 2	R3/4
Observações sobre material	Conforme RoHS

Figura C.17 – Informação catálogo Festo (União em T)

niple duplo
NPFC-D-2R34-M
Código da peça: 8030288

FESTO



Ficha técnica

Característica	Valores
Informação sobre material, conexão roscada	Latão niquelado
Tamanho da embalagem	10
Pressão de trabalho	-0,95 ... 50 bar
Meio operacional	Ar comprimido conforme ISO8573-1:2010 [-:-:-]
Classe de resistência à corrosão KBK	1 – Resistência à corrosão baixa
Temperatura ambiente	-20 ... 150 °C
Peso do produto	80,14 g
Conexão pneumática 1	R3/4
Observações sobre material	Conforme RoHS

Figura C.18 – Informação catálogo Festo (União reta)

Barbed hose fittings C-P/N-P, for hose clip

Technical data

FESTO

Barbed hose fitting N-...-P-...-MS
Brass design

Plastic tubing is inserted and then secured with a hose clip SK.

General technical data	
Type of seal on threaded plug	Sealing ring OK

Operating and environmental conditions	
Operating pressure for entire temperature range [bar]	−0.95 ... +16
Operating medium	Compressed air to ISO 8573-1:2010 [7:–:–]
Note on operating/pilot medium	Lubricated operation possible (in which case lubricated operation will always be required)
Corrosion resistance class CRC[1)]	1

1) Corrosion resistance class CRC 1 to Festo standard FN 940070
Low corrosion stress. For dry indoor applications or transport and storage protection. Also applies to parts behind covers, in the non-visible interior area, and parts which are covered in the application (e.g. drive trunnions).

Materials	
Housing	Brass
Note on materials	RoHS-compliant

Dimensions and ordering data

Pneumatic connection D1		Nominal width [mm]	D2	L1	L2	L3		Part No.	Type	PU[1)]
G thread with sealing ring										
G1/8	PK-6	4.5	7	34.7	4.9	24.2	13	15630	N-1/8-P-6-MS	10
G1/4	PK-6	4.5	7	37.1	5.8	24.1	17	15631	N-1/4-P-6-MS	10
	PK-9	6.5	10	37.1	5.8	24.1	17	15632	N-1/4-P-9-MS	10
G3/8	PK-6	4.5	7	38.1	6.8	24.1	19	15633	N-3/8-P-6-MS	10
	PK-9	7.6	10	38.1	6.8	24.1	19	15634	N-3/8-P-9-MS	10
	PK-13	11	14.8	45.4	6.8	30	19	36161	N-3/8-P-13-MS	1
G1/2	PK-9	8	10.3	39.5	8.15	24	24	15635	N-1/2-P-9-MS	1
	PK-13	11	14.8	45.5	8.15	30	24	15636	N-1/2-P-13-MS	1
G3/4	PK-13	11	14.8	50	9.05	30	32	15637	N-3/4-P-13-MS	1
	PK-19	16.5	20.8	56	9.05	36	32	15638	N-3/4-P-19-MS	1

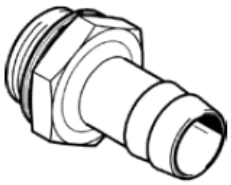
1) Packaging unit

Figura C.19 – Informação catálogo Festo (Ligação espigão)

espigão
N-3/4-P-13-MS
Código da peça: 15637

FESTO

Execução em latão



Ficha técnica

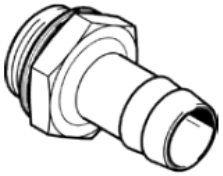
Característica	Valores
Diâmetro nominal	11 mm
Tipo de vedação no espigão aparafusado	Anel de vedação
Faixa completa de temperatura da pressão operacional	-0,95 ... 16 bar
Meio operacional	Ar comprimido conforme ISO 8573-1:2010 [7:-:-]
Observação sobre meio operacional e do piloto	Permite operação com lubrificação (necessária para operações subsequentes)
Classe de resistência à corrosão KBK	1 – Resistência à corrosão baixa
Conexão pneumática 1	Rosca externa G3/4
Conexão pneumática 2	Diâmetro interno para tubulação 13 mm
Observações sobre material	Conforme RoHS

Figura C.20 – Informação catálogo Festo (Ligação espigão)

espigão
N-3/4-P-19-MS
Código da peça: 15638

FESTO

Execução em latão



Ficha técnica

Característica	Valores
Diâmetro nominal	16,5 mm
Tipo de vedação no espigão aparafusado	Anel de vedação
Faixa completa de temperatura da pressão operacional	-0,95 ... 16 bar
Meio operacional	Ar comprimido conforme ISO 8573-1:2010 [7:-:-]
Observação sobre meio operacional e do piloto	Permite operação com lubrificação (necessária para operações s ubsequentes)
Classe de resistência à corrosão KBK	1 – Resistência à corrosão baixa
Conexão pneumática 1	Rosca externa G3/4
Conexão pneumática 2	Para tubos com diâmetro interno de 19 mm
Observações sobre material	Conforme RoHS

Figura C.21 – Informação catálogo Festo (Ligação espigão)

ACESSÓRIOS INOX AISI 316

ETOPI

www.etopi.pt etopi@etopi.pt Tel: 21 926 72 40 Fax: 21 926 72 49

ACESSÓRIOS STANDARD

201

CURVA 90º

CÓDIGO	ROSCA
E6251001	1/8
E6251002	1/4
E6251003	3/8
E6251004	1/2
E6251005	3/4
E6251006	1
E6251007	1¼
E6251008	1½
E6251009	2

207

CASQUILHO

CÓDIGO	ROSCA
E6200002	1/8
E6200003	1/4
E6200004	3/8
E6200005	1/2
E6200006	3/4
E6200007	1
E6200008	1¼
E6200009	1½
E6200010	2

217

UNIÃO

CÓDIGO	ROSCA
E6230001	1/8
E6230002	1/4
E6230003	3/8
E6230004	1/2
E6230005	3/4
E6230006	1

201A

CURVA REDUÇÃO

CÓDIGO	ROSCA
E6251A02	3/8→1/4
E6251A03	1/2→3/8
E6251A04	3/4→3/8
E6251A05	3/4→1/2
E6251A06	1→1/2

207A

CASQUILHO RED.

CÓDIGO	ROSCA
E6202001	1/4→1/8
E6202002	3/8→1/8
E6202003	3/8→1/4
E6202004	1/2→1/8
E6202005	1/2→1/4
E6202006	1/2→3/8
E6202007	3/4→1/4
E6202009	3/4→1/2
E6202012	1→1/2
E6202013	1→3/4
E6202014	1¼→1/2
E6202015	1¼→3/4
E6202016	1¼→1
E6202017	1½→1/2
E6202018	1½→3/4
E6202019	1½→1
E6202021	2→1/2
E6202022	2→3/4
E6202023	2→1

204

CURVA M/F

CÓDIGO	ROSCA
E6252001	1/8
E6252002	1/4
E6252003	3/8
E6252004	1/2
E6252005	3/4
E6252006	1

202

" T "

CÓDIGO	ROSCA
E6240001	1/8
E6240002	1/4
E6240003	3/8
E6240004	1/2
E6240005	3/4
E6240006	1
E6240007	1¼
E6240008	1½
E6240009	2

206C

SEDE CÓNICA M/F

CÓDIGO	ROSCA
E6206101	1/8
E6206102	1/4
E6206103	3/8
E6206104	1/2
E6206105	3/4
E6206106	1
E6206107	1¼
E6206108	1½
E6206109	2

205

CURVA 45º

CÓDIGO	ROSCA
E6250001	1/8
E6250002	1/4
E6250003	3/8
E6250004	1/2
E6250005	3/4
E6250006	1

209

PORCA REDUÇÃO

CÓDIGO	ROSCA
E6208002	1/4→1/8
E6208003	3/8→1/8
E6208004	3/8→1/4
E6208005	1/2→1/8
E6208006	1/2→1/4
E6208007	1/2→3/8
E6208008	3/4→1/8
E6208009	3/4→1/4
E6208011	3/4→1/2
E6208015	1→1/2
E6208016	1→3/4
E6208017	1¼→1/2
E6208018	1¼→3/4
E6208019	1¼→1
E6208020	1½→1/2
E6208021	1½→3/4
E6208022	1½→1
E6208024	2→1/2
E6208025	2→3/4
E6208026	2→1

222

CASQUILHO RED. M/F

CÓDIGO	ROSCA
E6204001	1/8→1/4
E6204003	1/4→3/8
E6204005	1/4→1/2
E6204006	3/8→1/2
E6204008	1/2→3/4
E6204010	1/2→1
E6204011	3/4→1

222

CASQUILHO M/F

CÓDIGO	ROSCA
E6204002	1/4→1/4
E6204004	3/8→3/8
E6204007	1/2→1/2
E6204009	3/4→3/4
E6204012	1→1

206A

SEDE CÓNICA F/F

CÓDIGO	ROSCA
E6206001	1/8
E6206002	1/4
E6206003	3/8
E6206004	1/2
E6206005	3/4
E6206006	1
E6206007	1¼
E6206008	1½
E6206009	2

216

LIGAÇÃO MANGUEIRA

CÓDIGO	MANG.	ROSCA
E6234001	7	1/8
E6234002	7	1/4
E6234003	9	1/8
E6234004	9	1/4
E6234005	9	3/8
E6234006	9	1/2
E6234007	11	1/4
E6234008	11	3/8
E6234009	11	1/2
E6234010	14	1/4
E6234011	14	3/8
E6234012	14	1/2
E6234013	14	3/4
E6234014	16	3/8
E6234015	16	1/2
E6234016	16	3/4
E6234018	20	1/2
E6234019	20	3/4
E6234020	20	1
E6234021	26	3/4
E6234022	26	1
E6234023	33	1¼
E6234024	39	1½
E6234026	51	2

219

PORCA

CÓDIGO	ROSCA
E6255001	1/8
E6255002	1/4
E6255003	3/8
E6255004	1/2
E6255005	3/4
E6255006	1

208

TAMPÃO

CÓDIGO	ROSCA
E6232001	1/8
E6232002	1/4
E6232003	3/8
E6232004	1/2
E6232005	3/4

ACESSÓRIOS INOX AISI 316

Figura C.22 – Informação catálogo Festo (Ligação espigão)

Rubber tubing P

Technical data

FESTO

Rubber tubing P,
with fibre reinforcement

Highly flexible tubing with fibre reinforcement for barbed hose fitting N-...-P and hose clip SK

Operating and environmental conditions	
Operating pressure for entire temperature range [bar]	−0.95 ... +16
Operating medium	Compressed air to ISO 8573-1:2010 [7:−:−]
Ambient temperature [°C]	−20 ... +80

Materials				
Type	P-6	P-9	P-13	P-19
Shore hardness	A 68 ±5		A 71 ±5	
Tube	NBR		EPDM, SBR	
Note on materials	RoHS-compliant			
	Free of copper and PTFE			

Dimensions and ordering data								
O.D. [mm]	I.D. [mm]	Min. bending radius [mm]	Flow-relevant bending radius [mm]	Weight [kg/m]	Colour	Part No.	Type	PU[1] [m]
13	6	20	45	0.144	Blue	2231	P-6-BL	40
16	9	30	60	0.186	Blue	2232	P-9-BL	40
23	13	50	100	0.40	Black	2234	P-13-SW	40
31	19	60	200	0.649	Black	2235	P-19-SW	40

1) Packaging unit

Figura C.23 - Informação catálogo Festo (Tubo para ar comprimido)

Installation information

Prior to installation and use, check if the identification number on the shock absorber or on the package corresponds to the number on the delivery sheet. Industrial shock absorbers are maintenance-free and ready-to-fit.

Operating temperature range: 0 °C to 66 °C

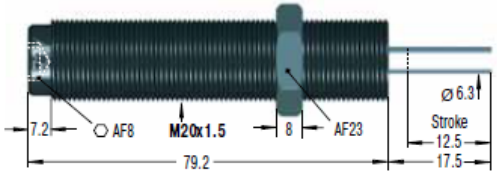
Mounting: In any position, but always so that the complete stroke can be used. The shock absorber is to be mounted so that the forces can be guided centrally via the piston rod.
The maximum permissible side load of 4° should not be exceeded. An existing side load leads generally to a reduced lifetime. When exceeding the maximum permissible side load, a side load adaptor should be used.

WARNING

- **Thermal effect: The values given in the capacity chart W_e and me (see operating and installation instructions or main catalogue) are valid for room temperature. Different values apply for higher temperatures.**
- **Moving masses can lead to injuries or bodily harm when installing the shock absorber. Secure moving masses against accidental movement.**
- **The shock absorbers may be unsuitable for the application and show insufficient damping performance. Check for proper suitability of shock absorber.**
- **When operating outside the allowed temperature range, the shock absorber may lose its functionality. Permissible temperature range must be adhered to. Do not paint the shock absorber due to heat radiation.**
- **Ambient fluids, gases and dirt particles may affect or damage the sealing system and lead to failure of the shock absorber. Piston rods and sealing systems must be protected against foreign substances.**
- **Damage to the piston rod surface may destroy the sealing system. Do not grease, oil, etc. the piston rod and protect it from dirt particles.**
- **The piston rod can be torn out of the shock absorber. Do not put tensile stress on the piston rod.**
- **The shock absorber can tear off upon impact. The mount must be calculated so that the maximum operating reaction forces can be accepted with sufficient safety. The maximum reaction forces given in the calculation report may deviate from the actual reaction forces since these are based on theoretical values.**

Disposal of packaging

Dispose packaging in an environmentally safe manner. The recycling of packaging saves raw materials and lowers the amount of waste. The used packaging materials do not contain illegal substances.



Mounting Options

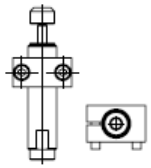
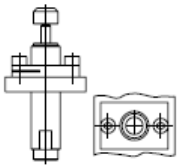
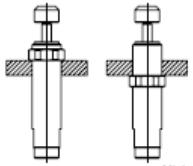
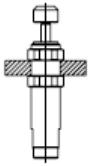
Usage of the clamp mount MB	Usage of the rectangular flange RF
	
Screwing in the shock absorbers into a tapped hole with an additional locknut	**Mounting the shock absorbers in the tapped hole with two locknuts**
 Tightening torque: KM20 = 27-30 Nm; Minimum thread depth: 1.5 x thread diameter	 Tightening torque: KM20 = 27-30 Nm

Figura C.24 – Informação catálogo ACE (amortecedor)

Capacity Chart

Type	Max. Energy Capacity W_3 Nm/Cycle	Max. Energy Capacity W_4 Nm/h	Effective Weight me Self-Compensating me min. kg	Effective Weight me Self-Compensating me max. kg	Min. Return Force N	Max. Return Force N	Rod Reset Time s	[1]Max. Side Load Angle °	Weight kg
MC150EUM	20	34000	0.9	10	3	8	0.4	4	0.06
MC150EUMH	20	34000	8.6	86	3	8	0.4	4	0.06
MC150EUMH2	20	34000	70	200	3	8	0.4	4	0.06
MC150EUMH3	20	34000	181	408	3	8	1	4	0.06
MC225EUM	41	45000	2.3	25	4	9	0.3	4	0.15
MC225EUMH	41	45000	23	230	4	9	0.3	4	0.15
MC225EUMH2	41	45000	180	910	4	9	0.3	4	0.15
MC225EUMH3	41	45000	816	1814	4	9	0.3	4	0.15
MC600EUM	136	68000	9	136	5	10	0.6	2	0.26
MC600EUMH	136	68000	113	1130	5	10	0.6	2	0.26
MC600EUMH2	136	68000	400	2300	5	10	0.6	2	0.26
MC600EUMH3	136	68000	2177	4536	5	10	0.6	2	0.26

[1] For applications with higher side load angles please contact ACE.

Technical Data

Impact velocity range: **0,06 m/s to 6 m/s** (Depending on the hardness range)

Piston Rod Seal: **Rolling diaphragm seal EPDM ethylene-propylene**

Operating fluid: **Silicone oil** (Silicone-free type available on request)

Piston Rod: **Hardened, stainless steel**

Locknut: **Steel with black oxide finish**

Shock absorber body: **Steel nitride hardened steel**

Tightening torque Locknut: MC150EUM: **13 – 14 Nm** MC225EUM: **27 – 30 Nm** MC600EUM: **60 – 66 Nm**

Operating temperature range: **0 °C to 66 °C**

Figura C.25 – Informação catálogo ACE (amortecedor)

SENSORES DE DEFORMAÇÃO/TENSÃO COM FIAÇÃO
PADRÃO LINEAR DE PRECISÃO

Série KFH

Modelos com 2 ou 3-Fios
120 ou 350 Ω
Comprimentos de Grade de 0,6 a 20 mm

- Com Fiação para Instalação Rápida
- Nenhuma Solda na Ponta de Medição
- Amplo Intervalo de Temperatura
- Modelos com 2 ou 3-Fios
- Marcas de Alinhamento Claras
- Ligação com Adesivos de Cura Quente ou Fria
- Os Fios PTFE na Ponta de Fixação Previnem a Aderência Durante a Instalação

Os sensores de padrão linear de precisão com grades de comprimento miniatura e médio são para uso geral e aplicações de análise de tensões. Disponíveis com dois cabos de 1 metro ou três cabos de 3 metros e resistência a 120 ou 350 Ω. Todos os modelos são compensados para o aço.

Sensor de Deformação/Tensão, mostrado em escala maior que a real.

Para fazer seu pedido

Cabos de PADRÃO dos SENSORES não mostrados	Nº DO MODELO Pacote com 10	RESISTÊNCIA NOM. (Ω)	DIMENSÕES mm (polegadas) GRADE A	GRADE B	TRANSPORTADOR C	TRANSPORTADOR D	V* MAX (Vrms)	COMP TEMP	COMPRIMENTO DO CABO DE TERMINAÇÃO
Mostrado em escala maior que a real, 0,3 mm	**GRADE de 0,3 mm**								
	KFH-03-120-C1-11L1M2R	120	0,3 (0,012)	1,96 (0,077)	4,5 (0,18)	3,9 (0,15)	1,5	ST	Dois fios de 1 m
	KFH-03-120-C1-11L3M2R	120					1,5	ST	Três fios de 3 m
Mostrado em escala maior que a real, 0,6 mm	**GRADE de 0,6 mm**								
	KFH-06-120-C1-11L1M2R	120	0,6 (0,024)	1,1 (0,043)	4,8 (0,19)	3,9 (0,15)	1,5	ST	Dois fios de 1 m
	KFH-06-120-C1-11L3M3R	120					1,5	ST	Três fios de 3 m
Mostrado em escala maior que a real, 1,5 mm	**GRADE de 1,5 mm**								
	KFH-1,5-120-C1-11L1M2R	120	1,5 (0,059)	1,5 (0,059)	5,8 (0,23)	3,9 (0,15)	2,5	ST	Dois fios de 1 m
	KFH-1,5-120-C1-11L3M3R	120					2,5	ST	Três fios de 3 m
Mostrado em escala real, 0,3 mm	**GRADE de 3 mm**								
	KFH-3-120-C1-11L1M2R	120	3,0 (0,118)	2,0 (0,079)	7,4 (0,29)	3,9 (0,15)	4	ST	Dois fios de 1 m
	KFH-3-120-C1-11L3M3R	120					4	ST	Três fios de 3 m
	KFH-3-350-C1-11L1M2R	350					9	ST	Dois fios de 1 m
	KFH-3-350-C1-11L3M3R	350					9	ST	Três fios de 3 m
Mostrado em escala real, 0,6 mm	**GRADE de 6 mm**								
	KFH-6-120-C1-11L1M2R	120	6,0 (0,24)	2,0 (0,079)	10,5 (0,41)	3,9 (0,15)	8	ST	Dois fios de 1 m
	KFH-6-120-C1-11L3M3S	120					8	ST	Três fios de 3 m
	KFH-6-350-C1-11L1M2R	350					15	ST	Dois fios de 1 m
	KFH-6-350-C1-11L3M3R	350					15	ST	Três fios de 3 m
Mostrado em escala real, 0,10 mm	**GRADE de 10 mm**								
	KFH-10-120-C1-11L1M2R	120	10 (0,39)	3,0 (0,12)	14,8 (0,58)	4,8 (0,19)	14	ST	Dois fios de 1 m
	KFH-10-120-C1-11L3M3R	120					14	ST	Três fios de 3 m
Mostrado em escala real, 0,20 mm	**GRADE de 20 mm**								
	KFH-20-120-C1-11L1M2R	120	20 (0,79)	3,0 (0,12)	25,2 (0,99)	4,8 (0,19)	7	ST	Dois fios de 1 m
	KFH-20-120-C1-11L3M3R	120					7	ST	Três fios de 3 m

ACESSÓRIOS

Nº DO MODELO	DESCRIÇÃO
TT300	Kit completo de adesivo de cura por calor
SG496	1 oz de cianoacrilato com base de metila (aproximadamente 750 medidas)
SG401	0,1 oz de cianoacrilato com base de etila (aproximadamente 50 medidas)

** Tensão Máxima permitida da ponte de energização (Vrms)*

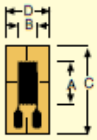
Exemplos de pedidos: KFH-1,5-120-C1-11L1M2S, *uma grade linear de 1,5 mm, 120 Ω, com dois fios de 1 m (3,3').*
KFH-3-350-C1-11L3M3S, *uma grade linear de 3mm, 350 Ω, com três fios de 3 m (9,8).*

E-2

Figura C.26 – Informação catálogo Ómega (extensómetros)

ESPECIFICAÇÕES

Construção do Sensor de Deformação/Tensão		Sensor de deformação/tensão em lâmina com grade de medição incorporada
Grade de Medição		
Material		Constantan
Espessura	µm (micropolegada)	3,8 ou 5 (150 ou 197), dependendo do tipo de sensor de deformação/tensão
Transportador		
Material		Poliimida
Espessura	µm (micropolegada)	45 ± 10 (1,772 ± 394)
Conexões		PTFE, Ø - 0,051 mm², aproximadamente 50 mm de comprimento, ligado a cabos em fita de 28 AWG (isolado em PVC) através de mangas de solda em configurações de 2 ou 3-fios
Resistência¹ Nominal	Ω	120 ou 350 dependendo da bitola
Tolerancia da Resistência¹	%	±0,35
com 0,6 mm e 1,5 mm de comprimento de grade	%	±1
Fator de Deformação		aproximadamente 2 (indicado no pacote)
Tolerância de Fator de Deformação	%	±1
com 0,6 mm e 1,5 mm de comprimento de grade	%	±1,5
Coeficiente de temperatura do fator de deformação	1/K [1/°F]	(115 ± 10) x 10^{-6} [(64 ± 5,5) x 10^{-6}]
Valor nominal do coeficiente de temperatura do fator de deformação		Especificado em cada pacote
Temperatura de Referência	°C (°F)	23
Intervalo Operacional de Temperatura		Cabo PTFE
para a medição estática (relacionado a ponto zero)	°C (°F)	-10 a 155 (-14 a 320)
para a medição dinâmica (não relacionado a ponto zero)	°C (°F)	-10 a 155 (-14 a 320)
Sensibilidade Transversal		
para sensor linear 3mm 120Ω	%	±0,2
Resposta de Temperatura		Especificado em cada pacote
Resposta de temperatura conforme necessário, adaptada para o coeficiente de expansão térmica		10,8 x 10-6 (6,0 x 10-6)
α para alumínio	1/K [1/°F]	23 x 10-6 (12,8 x 10-6)
α para material plástico	1/K [1/°F]	65 x 10-6 (36,1 x 10-6)
α para aço austenítico	1/K [1/°F]	16 x 10-6 (8,9 x 10-6)
α para titânio	1/K [1/°F]	9 x 10-6 (5,0 x 10-6)
α para molibdênio	1/K [1/°F]	5,4 x 10-6 (3,0 x 10-6)
α para quartzo	1/K [1/°F]	0,05 x 10-6 (0,3 x 10-6)
Tolerância da resposta de temperatura	°C (°F)	-10 a 120 (-14 a 248)
Histerese Mecânica		
1) à temperatura de referência e deformação/tensão mecânica L = 1000 µm/m (microtensão) e bitola linear de 3mm 120Ω		
no 1° ciclo de carga e adesivo SG496	µm/m (microtensão)	1
no 3° ciclo de carga e adesivo SG496	µm/m (microtensão)	0,5
Alongamento Máximo		
a temperatura de referência e fator de deformação linear 3mm 120 Ω		
Valor absoluto da deformação/tensão mecânica para direção positiva	µm/m (microtensão)	20.000 ± 2%
	µm/m (microtensão)	25.000 ± 2,5%
Duração da Fadiga		
a temperatura de referência e fator de deformação linear 3mm 120 Ω		
Número alcançável de ciclos de carga L_v em		
Tensão Alternada L_W = ±1000 µm/m e		
variação do ponto zero ≤ 300	µm/m (microtensão)	>1 x 10^7 (o teste foi interrompido)
variação do ponto zero ≤ 30	µm/m (microtensão)	5 x 10^6
Raio Mínimo de Curvatura, Longitudinal e Transversal, à Temperatura de Referência		
dentro da área de medição da grade	mm (polegadas)	0,3 (0,012)
dentro da área de guia da solda	mm (polegadas)	10 (0,394)
Materiais de Colagem Aplicáveis		
Adesivos de Cura a Frio		SG496, SG401
Adesivos de Cura a Calor		TT300



Chave das Dimensões:
GRADE
A: Comprimento do sensor ativo
B: Largura do sensor ativo
TRANSPORTADOR
C: Comprimento da matriz
D: Largura da matriz

E-5

Figura C.27 – Informação catálogo Ómega (extensómetros)

WAVEACE 2000 SPECIFICATIONS

	WaveAce 2002	WaveAce 2004	WaveAce 2012	WaveAce 2014	WaveAce 2022	WaveAce 2024	WaveAce 2032	WaveAce 2034
Vertical								
Bandwidth	70 MHz	70 MHz	100 MHz	100 MHz	200 MHz	200 MHz	300 MHz	300 MHz
Rise Time	5.0 ns	5.0 ns	3.5 ns	3.5 ns	1.75 ns	1.75 ns	1.2 ns	1.2 ns
Input Channels	2	4	2	4	2	4	2	4
Vertical Resolution	8-bits							
Vertical Sensitivity	2 mV/div–5 V/div							
Bandwidth Limiting Filter	20 MHz							
Maximum Input Voltage	400 Vpk, CAT I				400 Vpk, CAT I (1 MΩ), 5 V_{rms} (50 Ω)			
Input Coupling	GND, DC 1 MΩ, AC 1 MΩ				GND, DC 1 MΩ, AC 1 MΩ, 50 Ω			
Input Impedance	1 MΩ || 18 pF				1 MΩ || 18 pF, 50 Ω			
Acquisition								
Sampling Rate (Single Shot)	2 GS/s (interleaved) 1 GS/s (all channels)							
Sampling Rate (Equivalent Time)	50 GS/s							
Peak Detect Period	2.5 ns							
Memory Length	12 kpts/Ch							
Maximum Memory	24 kpts							
Timebase Range	5.0 ns/div – 50 s/div		2.5 ns/div – 50 s/div				1.0 ns - 50 s/div	
Probes								
Standard Probes	10:1, 1:1 Switchable Passive Probe (one per channel)							
Triggering								
Triggers	Edge, Pulse Width, Video, Slope (Rise Time), Alternate							
Measure, Math and Wave Recorder								
Measure	Amplitude, Average, Base, Burst Width, Cyclic RMS, + Duty Cycle, - Duty Cycle, Fall Time, Frequency, Max, Mean, Min, Overshoot, Peak-Peak, Period, Phase, Preshoot, Rise Time, RMS, Top, + Width, - Width. Plus 9 advanced parameters for edge to edge timing measurements							
Math	Add, Subtract, Multiply, Divide, FFT (up to 1 kpts with Rectangular, Von Hann, Hamming or Blackman windows							
Waveform Sequence Recorder	Record and playback a sequence of up to 2,500 waveforms							
Input/Output Interfaces								
USB	USB host port for flash drives, USB device port for connecting to PC and printers							
LAN	LAN port for connection to PC using WaveStudio software							
Physical								
Dimensions (HWD)	163 mm x 360 mm x 124.1 mm; 6.42" x 14.17" x 4.89"							
Weight	3.33 kg; 7.40 lbs.							
Power Requirements								
	100 - 240 V (± 10%) at 50 / 60 / 400 Hz (± 5%). Automatic AC voltage selection. Max power consumption: 50 W							
Compliance								
	CE Compliant, UL and cUL listed. Conforms to EN 61326-1, EN 61010-1, UL 61010-1 2nd edition, and CSA C22.2 No. 61010-1-04.							

Figura C.28 – Informação catálogo LeCroy (osciloscópio)

Signal Conditioning Amplifier

FEATURES

- Plug-in amplifier design; amplifiers are removable from the front panel without rear access
- Constant-voltage or constant-current excitation; 0.5 to 15V or 0.5 to 30 mA; selectable by single internal switch
- Calibrated gain from 1 to 3300; adjustable front-panel gain switch and calibrated front-panel ten turn potentiometer
- Front-panel monitoring of: ±10V output; excitation; automatic balance status; and amplifier balance
- Automatic wide range-bridge balance with battery backup to retain balance in power-off condition
- Input coupling; selectable AC or DC by internal jumpers
- Fully grounded input amplifier; ±350 VDC or peak AC common-mode operating voltage
- Full-power bandwith of 100 kHz at all gain settings; slew rate of 6.3 V/µs
- Built-in four-pole Bessel low-pass filter with cutoff frequencies of 1 Hz, 10 Hz, 100 Hz, 1 kHz and 10 kHz; front-panel frequency selection switch
- Two simultaneous buffered outputs; ±10V and tape 1.0 VRMS; will drive up to 0.15 µF without instability
- Stable, proprietary bridge completion module for quarter- and half-bridge 120- and 350-ohm strain gage and transducer circuits
- 120-ohm dummy easily configured for 1000-ohm completion
- Built-in shunt calibration circuits; internal user-selectable configurations to provide two-point shunting of any bridge component or two-point double shunt calibration of transducers
- Optically isolated shunt calibration relays provided as standard; built-in power supply for relay operation is provided in ten-channel rack adapter and four-channel enclosure

DESCRIPTION

The 2200 Signal Conditioning System incorporates, as standard, all the features necessary for precise conditioning of strain gage and transducer inputs in the most severe operating environments.

The 2210B Amplifiers plug in from the front of the ten-channel 2250A Rack Adapter or four-channel 2260B Portable Enclosure without removing the rear-panel input connections.

Among the features of the 2210B Amplifier are isolated constant-voltage/constant-current excitation, guarded input structure with ±350V common-mode capability, ±10V and tape outputs, automatic wide-range bridge balance and four-pole Bessel low-pass filter.

Operating controls of the 2210B Amplifier are conveniently arranged and clearly marked to minimize the possibility of operator error. Constant-voltage or constant-current excitation, calibration configuration, and other optional operating modes are selected by easily accessible internal switches or jumpers.

TYPICAL 2200 SYSTEM CONFIGURATIONS

The 2200 Signal Conditioning Amplifier Modules can be used as stand-alone single-channel units, or can be plugged into racks for multi-channel testing.

Model 2260B Portable Enclosure accepts up to four signal conditioning/amplifier modules.

Model 2250A Rack Adapter allows assembly of signal conditioning amplifier modules for multi-channel testing. Ten-channel system shown in rack. All wiring is built-in to accept adjacent ten-channel systems.

Complete specifications are given on the following pages.

Figura C.29 – Informação catálogo Vishay (amplificador)

Signal Conditioning Amplifier

2210B SIGNAL CONDITIONING AMPLIFIER SPECIFICATIONS

INPUT

Input Impedance

DC-coupled: 22 MΩ shunted by 250 pF
AC-coupled: 1.1 µF in series with 20 kΩ
low frequency cutoff (3 dB) 8 Hz norm.

Source Current

±10 nA typical; ±20 nA maximum

Configuration

2- to 10-wire plus guard shield accepts quarter-, half-, or full-bridge strain gage or transducer inputs. Internal half-bridge, dummy 350Ω and dummy 120Ω completion gages, remote sense and four-wire calibration capability provided. 1000Ω completion capability also provided. Accepts inputs from ground-referenced or isolated devices.

Differential Input

Maximum differential input voltage of ±50 VDC or peak AC

Common-Mode Input

Maximum common-mode input voltage of ±350 VDC or peak AC

Guard Impedance

Greater than 250 kΩ to output common; greater than 1000 MΩ to power and rack ground

AMPLIFIER

Gain

1 to 3300; continuously variable; direct reading.
Gain steps X1, X10, X100, X300; with 10-turn counting knob, X1 to X11. Accuracy ±0.5%

Linearity

±0.01% of full scale at DC

Frequency Response

DC to 100 kHz: 3±0.2 dB at all gain settings and full output

DC to 50 kHz: 0.5dB max at all gain settings and full output

Gain Step vs Frequency Response (3 dB):

X300	100 kHz	X10	135 kHz
X100	120 kHz	X1	240 kHz

Slew Rate

6.3 V/µsec min at all gain settings

Noise

(350Ω source impedance, DC-coupled)

Referred-to-Input (RTI)

1 µV 0.1 Hz to 10 Hz p-p; 2 µV 0.1 Hz to 100 Hz p-p
3 µV 0.1 Hz to 100 kHz RMS

Referred-to-Output (RTO)

Output related noise is a function of the setting of the gain multiplier potentiometer

Zero Stability

±2 µV RTI, ±200 µV RTO at constant temp.

Temperature Coefficient of Zero

±1 µV/°C RTI, ±100 µV/°C RTO; –10°C to 60°C

Common-Mode Rejection

Gain	CRM (dB)	Gain	CRM (dB)
X1	82	X100	122
X10	102	X300	135

Common Mode Voltage

±350 VDC or peak AC, max operating

Standard Output

±10V @ 10 mA max

Tape Output

1.0 VRMS @ 10 mA max, or

Output AC-coupled

±10V @ 10 mA max (7 Hz, 3 dB)

Output Monitor

±10V standard monitored via front-panel jacks

Output Isolation

>1000 MΩ from power and rack ground

Output Protection

Protected against continuous short

Capacitive Loading

Up to 0.15 µF

Low Pass Filter

Four-pole Bessel low-pass filter with selectable 3 dB bandwidths of 1 Hz, 10 Hz, 100 Hz, 1 kHz and 10 kHz

CONSTANT-VOLTAGE EXCITATION

Range

0.50 to 15.0 VDC @ 85 mA max.

Noise

100 µV + 0.002% of excitation p-p max DC to 20 kHz

Line Regulation

200 µV + 0.01% of excitation max for line voltage change of 10% from nominal

Load Regulation

200 µV + 0.01% of excitation max for load variation of 10% of 90% of full load

Figura C.30 – Informação catálogo Vishay (amplificador)

Model		ODC1200 (axial model)				ODC 1200/90 (90° model)				ODC1201	
Measuring range		2mm	5mm	10mm	16mm	2mm [2]	5mm	10mm	16mm	20mm	30mm
Distance light source - receiver (free space) [1]		min. 20mm to max. 5m									
Linearity		±2% FSO		±3,5% FSO		±2% FSO		±3,5% FSO			
Resolution (dynamic) typ.		10µm	25µm	50µm	80µm	10µm	25µm	50µm	80µm	100µm	150µm
Measuring rate (frequency response)		100kHz (-3db)									
Light source		semiconductor laser <0.39mW, 670nm (red, laser class 1)									
Permissble ambient light		≤ 5000lx [3]									
Analogue output		0 ... 10VDC (adjustable gain)									
Temperature drift of the analogue output		≤130mV (at 10 - 50°C)									
Switching output		PNP dark switching and NPN bright switching (max. switching frequency 60kHz) adjustable signal threshold									
Shock		15g / 6ms									
Vibration		15g / 10Hz...1kHz									
Operation temperature		0 ... 50°C									
LED display		Switching state and dusty optics									
Storage temperature		-20 ... 70°C									
Operation voltage		12-32VDC, reverse polarity protection									
Mounting holes	straight up	M4 x 5mm								ø4.1mm	
	horizontal	M5 x 8mm								M4 x 6mm	
Weight (without cable)	light source	appr. 150g				appr. 170g				appr. 260g	
	receiver	appr. 120g				appr. 160g				appr. 220g	
Protection class		IP 67									

FSO = Full Scale Output
The quoted data apply for a constant room temperature of 20°C after a warm-up period of 30min,
in the range 10 ... 90% of the analogue output at a distance between light source and receiver of 0.5m.
Analogue offset <0.05V
[1] Increasing the distance, the measurement of hot targets is possible without damaging the controller electronics
[2] For gap measurements 50 - 400µm there is an controller option available: thrubeam operation with distances up to 700mm
[3] Shadowing from ambient daylight increases the signal stability

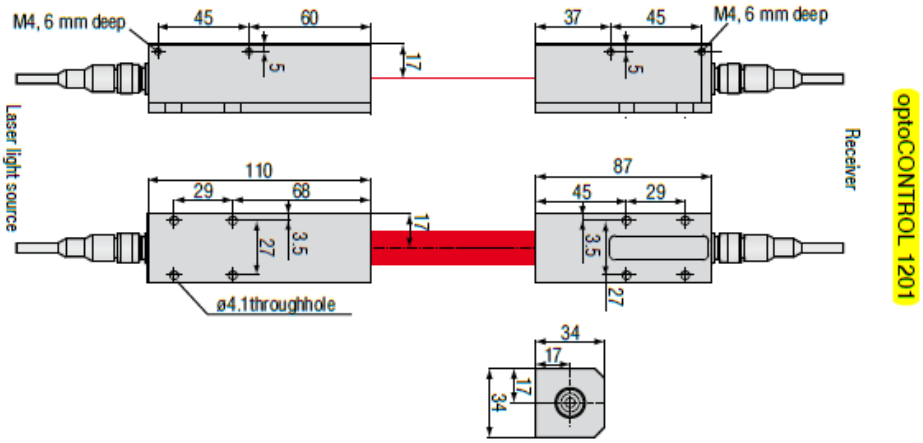


Figura C.31 – Informação catálogo Opto Control (sensor de velocidade)

Anexo D: Desenhos Técnicos de uma Barra de Kolsky